



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ**

**Θερμική ανάλυση γεννήτριας αξονικής ροής
μονίμων μαγνητών για τοπικά κατασκευασμένες
μικρές ανεμογεννήτριες**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βασίλειος Καρατάσος

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Θερμική ανάλυση γεννήτριας αξονικής ροής
μονίμων μαγνητών για τοπικά κατασκευασμένες
μικρές ανεμογεννήτριες**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βασίλειος Καρατάσος

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 20^η Οκτωβρίου 2015.

.....
Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σταύρος Σ. Παπαθανασίου
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Πάυλος Γεωργιλιάκης
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

.....

Βασίλειος Καρατάσος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Βασίλειος Καρατάσος, 2015

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η θερμική ανάλυση μικρών γεννητριών αξονικής ροής μόνιμων μαγνητών χωρίς πυρήνα στο στάτη για αιολικές εφαρμογές σε τοπικό επίπεδο.

Γίνεται μια εισαγωγή στην έννοια της ενδιάμεσης τεχνολογίας και στις εφαρμογές των μικρών ανεμογεννητριών. Επιπλέον, συγκρίνονται οι γεννήτριες αξονικής και ακτινικής ροής και αναφέρονται οι διαφορές τους. Στη συνέχεια, γίνεται βιβλιογραφική έρευνα στα είδη και τις τοπολογίες των γεννητριών αξονικής ροής.

Παράλληλα, αναλύεται η θεωρία των θερμικών φαινομένων, καθώς και των μηχανισμών μετάδοσης της θερμότητας, μαζί με τις εξισώσεις που τους περιγράφουν. Εξετάζονται οι θερμοκρασιακοί περιορισμοί των ηλεκτρικών μηχανών και οι τρόποι ψύξης τους.

Παρουσιάζεται το θερμικό μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων και γίνεται αναλυτική επίλυση των εξισώσεων του για δύο γεννήτριες ισχύος 600 W και 5 kW. Με βάση συγκεκριμένους συντελεστές του προηγούμενου μοντέλου, προσομοιώνεται τρισδιάστατα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων η θερμική συμπεριφορά των γεννητριών αυτών υπό συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας.

Στη συνέχεια, εξετάζονται οι ίδιες συνθήκες λειτουργίας στο εργαστήριο και τα πειραματικά αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά της προσομοίωσης. Υπολογίζονται οι αποκλίσεις των αποτελεσμάτων και μελετώνται πιθανά αίτια τους. Παράλληλα, συλλέγονται δεδομένα από τη γεννήτρια 600 W που έχει τοποθετηθεί σε πεδίο δοκιμών και πραγματοποιείται θερμική ανάλυσή της υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας.

Τέλος, εξάγονται συμπεράσματα και κατατίθενται βελτιωτικές προτάσεις.

Λέξεις κλειδιά:

ενδιάμεση τεχνολογία, χαμηλό κόστος, μικρές ανεμογεννήτριες, γεννήτριες αξονικής ροής, μόνιμοι μαγνήτες, θερμική ανάλυση, μετάδοση θερμότητας, θερμικές απώλειες, θερμικό μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, ανάλυση σε τρεις διαστάσεις, εργαστηριακές μετρήσεις, πεδίο δοκιμών.

Abstract

Subject of the present work is the thermal analysis of small axial flux coreless permanent magnet generators for wind energy applications on a local level.

An introduction is made on the principles of appropriate technology and the applications of small wind turbines. Furthermore, a comparison is conducted between axial and radial flux generators and their differences are presented. Subsequently, a bibliographic research is conducted on the types and topologies of axial flux generators.

Additionally, the theory of thermal phenomena is analysed, as well as the mechanisms of heat transfer, alongside the equations which describe them. The thermal limitations of electrical machines and their cooling methods are also examined.

The lumped parameter thermal model is presented and an analytical solution of its equations is conducted for two generators of nominal power 600 W and 5 kW. Based on specific coefficients of the previous model, the thermal behaviour of these generators is simulated three-dimensionally via the finite element method under specific operating conditions.

In addition, the same operating conditions are examined in the laboratory and the experimental results are compared with the simulation. The deviations between the various results are calculated and possible causes are studied. Moreover, data is collected from the 600 W generator which has been placed on a testing field and a thermal analysis under normal operating conditions is conducted.

Finally, conclusions are drawn and proposals for improvements and further work are presented.

Key words:

appropriate technology, low cost, small wind turbines, axial flux generators, permanent magnets, thermal analysis, heat transfer, thermal losses, lumped parameter thermal model, finite element method, three-dimensional analysis, laboratory measurements, testing field.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον Κώστα Λατούφη για τις υποδείξεις και την καθοδήγησή του κατά τη διεξαγωγή της εργασίας. Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου, καθηγητή Ε.Μ.Π., για την υποστήριξη της πρωτοβουλίας της διπλωματικής και τις υποδείξεις του.

Θα ήθελα να εκφράσω επίσης τις ευχαριστίες μου σε όσους με βοήθησαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας και χωρίς αυτούς θα ήταν δύσκολη η ολοκλήρωσή της, και ιδιαιτέρως τον φίλο και μηχανικό Κωνσταντίνο Πιερράτο για την καίρια συνεισφορά του.

Τέλος, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου και στους φίλους μου για τη στήριξη και την υπομονή τους όλο αυτό το διάστημα.

Στη μητέρα μου

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	15
1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	15
1.2 Ανεμογεννήτριες	16
1.2.1 Μικρές ανεμογεννήτριες.....	18
1.2.2 Η ανεμογεννήτρια του Hugh Piggott.....	19
1.2.3 Η ενδιάμεση τεχνολογία	19
1.3 Μηχανές μονίμων μαγνητών	22
1.4 Σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών αξονικής ροής	23
1.4.1 Τοπολογίες.....	24
1.4.2 Επιλεγόμενη τοπολογία	26
1.5 Μέθοδοι μέτρησης και ανάλυσης των θερμικών φαινομένων	26
Κεφάλαιο 2: Θερμικά Φαινόμενα	28
2.1 Γενικά	28
2.2 Για τις μηχανές μονίμων μαγνητών αξονικής ροής	29
2.3 Μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας.....	30
2.3.1 Αγωγή	30
2.3.2 Συναγωγή.....	35
2.3.3 Ακτινοβολία	43
2.4 Θερμοκρασιακοί περιορισμοί στις ηλεκτρικές μηχανές	44
2.5 Θερμική αντίσταση	45
2.6 Ψύξη στις ηλεκτρικές μηχανές.....	46
Κεφάλαιο 3: Θερμικό μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων	48
3.1 Θερμικό ισοδύναμο κύκλωμα	48
3.2 Διατήρηση της ενέργειας.....	52
3.3 Πειραματικός υπολογισμός του ονομαστικού ρυθμού ροής αέρα	52
3.4 Θερμική ανάλυση σύγχρονης γεννήτριας AFPM 600 W	53
3.4.1 Συντελεστής συναγωγής της εξωτερικής επιφάνειας του δίσκου του δρομέα	54
3.4.2 Συντελεστής συναγωγής της περιφέρειας του δίσκου του δρομέα.....	55
3.4.3 Συντελεστής συναγωγής συστήματος στάτη-δρομέα	55
3.4.4 Υπολογισμός θερμικών αντιστάσεων και λύση συστήματος εξισώσεων	57
3.5 Θερμική ανάλυση σύγχρονης γεννήτριας AFPM 5 kW.....	60
Κεφάλαιο 4: Θερμική ανάλυση με μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων	63

4.1 Μετάδοση θερμότητας στο εσωτερικό της μηχανής	63
4.1.1 Μετάδοση θερμότητας μέσω του μηχανισμού της αγωγής	63
4.1.2 Μετάδοση θερμότητας μέσω του μηχανισμού της συναγωγής	64
4.2 Οριακές συνθήκες θερμικού προβλήματος.....	65
4.3 Κώδικας πεπερασμένων στοιχείων	65
4.4 Σχεδίαση γεννήτριας.....	66
4.4.1 Χαρακτηριστικά σύγχρονης γεννήτριας AFPM 600W.....	67
4.4.2 Χαρακτηριστικά σύγχρονης γεννήτριας AFPM 5kW.....	74
4.5 Αποτελέσματα τρισδιάστατης θερμικής ανάλυσης	78
4.5.1 Αποτελέσματα σύγχρονης γεννήτριας AFPM 600 W.....	79
4.5.2 Αποτελέσματα σύγχρονης γεννήτριας AFPM 5 kW	94
4.6 Συμπεράσματα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων	102
Κεφάλαιο 5: Πειραματικές μετρήσεις	103
5.1 Πειραματική διάταξη	103
5.2 Επεξεργασία πειραματικών μετρήσεων	105
5.2.1 Αποτελέσματα σύγχρονης γεννήτριας AFPM 600 W.....	105
5.2.2 Αποτελέσματα σύγχρονης γεννήτριας AFPM 5 kW	115
5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων ANSYS και πειραματικών μετρήσεων	133
5.3.1 Σύγχρονη γεννήτρια AFPM 600 W	134
5.3.1 Σύγχρονη γεννήτρια AFPM 5 kW.....	136
5.4 Μετρήσεις πεδίου δοκιμών	137
5.5 Συμπεράσματα πειραμάτων-πεδίου δοκιμών	148
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και προτάσεις.....	150
6.1 Συμπεράσματα.....	150
6.1.1 Μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων - Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων	150
6.1.2 Πειραματικές μετρήσεις – Πεδίο δοκιμών.....	151
6.2 Προτάσεις.....	152
Παραρτήματα	154
Παράρτημα Α	154
Α.1 Κώδικας συγκεντρωμένων παραμέτρων για γεννήτρια AFPM 600 W.....	154
Α.2 Κώδικας συγκεντρωμένων παραμέτρων για γεννήτρια AFPM 5 kW	156
Βιβλιογραφία	158

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Τις τελευταίες δεκαετίες γίνεται όλο και περισσότερο κοινή συνείδηση η ανάγκη αποδοτικότερης χρήσης των πηγών ενέργειας γενικά, και ειδικότερα η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Μια τέτοια προσέγγιση είναι αναγκαία τόσο λόγω των πεπερασμένων αποθεμάτων των συμβατικών, μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όσο και λόγω της ανάγκης περιορισμού των δυσμενών επιπτώσεων, από περιβαλλοντικής απόψεως, της χρήσης τους, όπως είναι η εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αερίων του θερμοκηπίου. Ένας από του σημαντικότερους λόγους της αλλοίωσης των κλιματικών συνθηκών ανά τον κόσμο αποτελούν οι εκπομπές που οφείλονται στα εκατομμύρια τόνων ορυκτών καυσίμων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας στους συμβατικούς θερμικούς σταθμούς, γεγονός που καθιστά αναγκαία την απεξάρτηση του ανθρώπου, και ιδιαίτερα της ηλεκτροπαραγωγής, από τα ορυκτά καύσιμα. [1]

Η ανάγκη για την ευρύτερη αξιοποίηση των ΑΠΕ, καθώς και για την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδοτικών τεχνολογιών που δεσμεύουν το δυναμικό τους, παρουσιάσθηκε αρχικά μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση του 1973 και παγιώθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1990 μέσω του Πρωτοκόλλου του Κιότο [22]. Ως γνωστόν, το Πρωτόκολλο του Κιότο αποτελεί έναν «οδικό χάρτη», στον οποίο περιλαμβάνονται τα απαραίτητα βήματα για την μακροπρόθεσμη αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, που προκαλείται λόγω των ανθρωπογενών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Το πρωτόκολλο περιλαμβάνει τρεις ευέλικτους μηχανισμούς [2]:

1. την εμπορία δικαιωμάτων εκπομπών
2. την κοινή εφαρμογή, και
3. το μηχανισμό καθαρής ανάπτυξης

Ο πρώτος μηχανισμός περιλαμβάνει την αγοραπωλησία δικαιωμάτων εκπομπών μεταξύ ενδιαφερόμενων μερών, ενώ οι άλλο δύο βασίζονται σε προγράμματα έργων που θα προωθήσουν την «πράσινη» ανάπτυξη και τις επενδύσεις σε νέες εγκαταστάσεις ΑΠΕ. Αυτό επιχειρείται να γίνει με τον πιο οικονομικά αποδοτικό τρόπο, ώστε να μην επιβαρυνθεί η παγκόσμια οικονομία.

Τα τελευταία χρόνια είναι εμφανείς οι προσπάθειες που καταβάλλουν οι ανεπτυγμένες τεχνολογικά χώρες για να προσαρμοστούν στα νέα αυτά δεδομένα, με τη λήψη κατάλληλων νομοθετικών μέτρων, καθώς και την ανάπτυξη της τεχνολογίας των ΑΠΕ, με τέτοιο τρόπο ώστε το κόστος τους να είναι συγκρίσιμο με αυτό των συμβατικών πηγών ενέργειας. Τα κύρια πλεονεκτήματα των ΑΠΕ είναι τα εξής:

- Είναι πρακτικά ανεξάντλητες πηγές ενέργειας και συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από συμβατικούς ενεργειακούς πόρους οι οποίοι είναι εξαντλήσιμοι.
- Είναι φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο, έχουν σχεδόν μηδενικά κατάλοιπα και απόβλητα και συμβάλλουν στην άμβλυση του φαινομένου του

θερμοκηπίου, καθώς συνεισφέρουν στον περιορισμό της εκπομπής των αερίων του θερμοκηπίου.

- Με την ορθολογική χρήση των ΑΠΕ μπορούν να δοθούν διαφορετικές λύσεις για διαφορετικές ενεργειακές ανάγκες.
- Είναι εγχώριες πηγές ενέργειας και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτητοποίησης και της ενεργειακής ασφάλειας σε εθνικό επίπεδο.
- Είναι διάσπαρτες γεωγραφικά και συνεισφέρουν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος, δίνοντας τη δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών αναγκών σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, ανακουφίζοντας έτσι τα συστήματα υποδομής και μειώνοντας τις απώλειες από τη μεταφορά ενέργειας.
- Έχουν συνήθως χαμηλό λειτουργικό κόστος που δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα από τις τιμές των συμβατικών καυσίμων.
- Οι επενδύσεις των ΑΠΕ δημιουργούν σημαντικό αριθμό νέων θέσεων εργασίας, ειδικά σε τοπικό επίπεδο.
- Μπορούν να αποτελέσουν σε πολλές περιπτώσεις πυρήνα για την αναζωογόνηση οικονομικά και κοινωνικά υποβαθμισμένων περιοχών, καθώς και σημαντικό παράγοντα για την τοπική ανάπτυξη, με την προώθηση ανάλογων επενδύσεων (π.χ. καλλιέργειες με την χρήση γεωθερμικής ενέργειας).

Με βάση τις υφιστάμενες σήμερα τεχνολογίες, οι σημαντικότερες μορφές ΑΠΕ είναι οι ακόλουθες:

- Αιολική ενέργεια
- Υδροηλεκτρική ενέργεια
- Ηλιακή ενέργεια
- Γεωθερμική ενέργεια
- Ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων (ωκεανών και παλίρροιας)
- Βιομάζα
- Κυψέλες καυσίμου/υδρογόνου

1.2 Ανεμογεννήτριες

Από τις παραπάνω αναφερθείσες ΑΠΕ, οι πιο διαδεδομένες μορφές σήμερα είναι η αιολική και η υδροηλεκτρική ενέργεια, ενώ μεγάλη ανάπτυξη παρουσιάζει και η ηλιακή ενέργεια. Ωστόσο, η αιολική ενέργεια, υπό τις παρούσες τεχνολογικές συνθήκες, είναι η μόνη ικανή να παρέχει ηλεκτροπαραγωγή σε μεγέθη συγκρίσιμα με αυτά των συμβατικών σταθμών και για αυτόν το λόγο τα αιολικά πάρκα είναι οι πλέον διαδεδομένες εγκαταστάσεις ΑΠΕ.

Η πρώτη μεγάλη ανεμογεννήτρια, γνωστή ως Smith-Putnam, σχεδιάσθηκε και εγκαταστάθηκε στις ΗΠΑ. Η σχεδίασή της ξεκίνησε στα τέλη της δεκαετίας του 1930 και μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1940 είχε ξεκινήσει η πλήρης λειτουργία της. Είχε ισχύ 1,25 MW

και είχε δύο χαλύβδινα πτερύγια διαμέτρου περιστροφής 53 μέτρων, τοποθετημένα σε έναν πύργο ύψους 33,5 μέτρων. Ήταν η μεγαλύτερη ανεμογεννήτρια που κατασκευάστηκε μέχρι το 1979. Αυτό οφείλεται στην αναθέρμανση του ενδιαφέροντος για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, όπως σημειώθηκε και παραπάνω, κατά τις τελευταίες δεκαετίες.

Σαράντα χρόνια τεχνολογικής ανάπτυξης των ανεμογεννητριών λοιπόν έχουν οδηγήσει σε αποτελεσματικότερες κατασκευές. Μια σύγχρονη ανεμογεννήτρια παράγει ετησίως 200 φορές περισσότερη ηλεκτρική ισχύ και το κόστος της ανά kWh έχει μειωθεί κατά το ήμισυ σε σχέση με πριν από 25 χρόνια. Η Ευρώπη είναι πρωτοπόρος στον τομέα της εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας με σκοπό την ηλεκτροπαραγωγή, αφού στις μέρες μας η αιολική ενέργεια αποτελεί κάτι περισσότερο από το 5% της συνολικής καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη. Λόγω του γεγονότος ότι αυτή η μορφή ενέργειας είναι η φθηνότερη σε σχέση με τις άλλες ΑΠΕ, αναμένεται ότι το 2020 θα αποτελεί το 34% της συνολικής καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ στην Ευρώπη.

Αν αναλογιστεί κανείς τις ολοένα και αυξανόμενες ενεργειακές απαιτήσεις του πλανήτη, συμπεραίνει πως αυτή η περαιτέρω διεξόδυση των αιολικών πάρκων στην ηλεκτροπαραγωγή καθίσταται αναγκαία για το παρόν και μέλλον. Η ολοένα και μεγαλύτερη διεξόδυση ανεμογεννητριών, όχι μόνο υψηλής ισχύος, αλλά και χαμηλότερου επιπέδου ενέργειας, στο δίκτυο και το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παρέχει μια βιωσιμότερη μορφή ενέργειας, που καθίσταται συνεχώς πιο συμφέρουσα, καθώς είναι μια απεριόριστη πηγή ισχύος, χωρίς καμία επιβάρυνση στο περιβάλλον, με όλο και μικρότερο κόστος εγκατάστασης. Αξίζει να σημειωθεί πως η βασική αιτία της ραγδαίας ανάπτυξης και επικράτησης της αιολικής ενέργειας έναντι των άλλων μορφών ΑΠΕ είναι αυτό το σχετικά χαμηλό κόστος της. Μάλιστα, το κόστος της σχετικής τεχνολογίας είναι πολύ κοντά σε εκείνο της παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα, γεγονός που ανοίγει διάπλατα το δρόμο για την εξάπλωση της αιολικής ενέργειας παγκοσμίως. Χάρη στην τεχνολογική πρόοδο των τελευταίων δεκαετιών, το ειδικό κόστος παραγωγής αιολικής ενέργειας έχει ήδη πέσει κατά το ήμισυ από το 1990, και αναμένεται ότι η απόκλιση του κόστους παραγωγής αιολικής ενέργειας και του κόστους ενέργειας από ορυκτά καύσιμα θα συνεχίσει να μειώνεται.

Σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι κατά τη διάρκεια της λειτουργίας ενός αιολικού πάρκου δεν εκπέμπεται διοξείδιο του άνθρακα ή άλλα αέρια που ρυπαίνουν την ατμόσφαιρα, όπως το μονοξείδιο του άνθρακα, το διοξείδιο του θείου, καρκινογόνα μικροσωματίδια κ.ά., κάτι που συμβαίνει στην περίπτωση των συμβατικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σε όλη τη διάρκεια της χρήσης της, μία και μόνο ανεμογεννήτρια 1,5 MW μπορεί να εξοικονομήσει περί τους 80.000 τόνους ορυκτού άνθρακα. Αυτό σημαίνει πως όχι μόνο δεν εντείνεται το φαινόμενο του θερμοκηπίου, αλλά δεν υπάρχουν και αρνητικές συνέπειες στη δημόσια υγεία λόγω της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Επιπλέον, συμβάλλει στην προώθηση επενδύσεων που δίνουν τη δυνατότητα τοπικής ανάπτυξης σε υποβαθμισμένες περιοχές. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των ανεμογεννητριών είναι πως δε δεσμεύουν μεγάλες εκτάσεις εύφορου εδάφους, το οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για καλλιέργεια, καθώς η τοποθέτησή τους προϋποθέτει υψηλές ταχύτητες ανέμου, οι οποίες συναντώνται σε απόμακρα μέρη, όπως στις κορυφές βουνών ή στη θάλασσα. Ωστόσο, η απαραίτητη κατασκευαστική δραστηριότητα μπορεί να έχει επιπτώσεις

στο περιβάλλον. Η χωροθέτηση των αιολικών πάρκων, και ιδιαίτερα των θαλάσσιων (offshore) εγκαταστάσεων, πρέπει να συνοδεύεται από προσεκτική μελέτη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του έργου, ώστε να διασφαλίζεται η ομαλή ενσωμάτωσή τους στο τοπικό περιβάλλον και να ελαχιστοποιούνται οι επιπτώσεις τους στη βιοποικιλότητα. Αν η χωροθέτηση των ανεμογεννητριών δε σχεδιαστεί σωστά, είναι πιθανό να υπάρξουν αρνητικές συνέπειες για την χλωρίδα και την πανίδα, όπως, παραδείγματος χάρη, προβλήματα που μπορούν να δημιουργηθούν αν οι ανεμογεννήτριες τοποθετηθούν πάνω σε μεταναστευτικές οδούς πτηνών.

1.2.1 Μικρές ανεμογεννήτριες

Σε συμβατικά ηλεκτρικά συστήματα, η παραγόμενη ισχύς αιολικών πάρκων μεγάλης ισχύος τροφοδοτείται απευθείας στο εθνικό δίκτυο και εν συνεχεία, μέσω του δικτύου μεταφοράς, παρέχεται στα κέντρα κατανάλωσης και τους χρήστες που είναι συνδεδεμένοι στο δίκτυο. Μια εναλλακτική λύση αντί της σύνδεσης στο δίκτυο είναι τα μικρά αυτόνομα συστήματα ανεμογεννητριών, που έχουν ως σκοπό λειτουργίας την τροφοδότηση κατοικιών, αγροκτημάτων και απομακρυσμένων περιοχών, στις οποίες η πρόσβαση στο δίκτυο παρουσιάζει τεχνικοοικονομικές δυσκολίες.

Ως μικρές ανεμογεννήτριες χαρακτηρίζονται αυτές που έχουν ονομαστική ισχύ έως και 70 kW, ενώ ιδιαίτερα μικρές ανεμογεννήτριες ονομάζονται όσες έχουν ονομαστική ισχύ χαμηλότερη από 10 kW. Ο τύπος έλικας που έχει επικρατήσει στις μικρές ανεμογεννήτριες είναι η έλικα οριζόντιου άξονα περιστροφής με τρία πτερύγια. Το συνηθέστερο σύστημα αεροδυναμικού περιορισμού της ισχύος είναι το σύστημα furling, ενώ σε λιγότερες περιπτώσεις χρησιμοποιείται έλεγχος pitch και σπανιότερα έλεγχος stall. Η μεγάλη πλειοψηφία των μικρών ανεμογεννητριών διαθέτει γεννήτρια μονίμων μαγνητών, ενώ ένα μικρό ποσοστό διαθέτει γεννήτρια επαγωγής.

Υπάρχουν πολλές παράμετροι που χαρακτηρίζουν μια μικρή ανεμογεννήτρια. Το σημαντικότερο είναι η καμπύλη ισχύος, η οποία καθορίζει την παραγόμενη ενέργεια σε ένα χρονικό διάστημα ανάλογα με το αιολικό δυναμικό της περιοχής που βρίσκεται η εγκατάσταση. Οι μικρές ανεμογεννήτριες τοποθετούνται γενικά σε περιοχές με χαμηλότερη ετήσια μέση ταχύτητα ανέμου απ' ό,τι τα αιολικά πάρκα, οπότε η λειτουργία τους σε χαμηλότερους ανέμους είναι μια ακόμη σημαντική παράμετρος.

Είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί πως το ένα τρίτο του παγκόσμιου πληθυσμού αυτή τη στιγμή δεν έχει πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια. Για το λόγο αυτό, οι μικρές ανεμογεννήτριες με το χαμηλό τους κόστος, μπορούν να συμβάλλουν στην άνοδο του βιοτικού επιπέδου των κατοίκων των αναπτυσσόμενων χωρών, ηλεκτροδοτώντας σχολεία, κλινικές, ακόμα και ολόκληρες κοινότητες.

1.2.2 Η ανεμογεννήτρια του Hugh Piggott

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία μελετάται η θερμική συμπεριφορά της μικρής ανεμογεννήτριας του Hugh Piggott [3]. Το βασικό σχέδιο της συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας, σε μικρότερο ή μεγαλύτερο μέγεθος, έχει κατασκευαστεί σε πολλές χώρες της Ευρώπης, της Λατινικής Αμερικής και της Αφρικής, καθώς επίσης και σε σχολεία και πανεπιστήμια.

Η συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια έχει το χαρακτηριστικό πλεονέκτημα της δυνατότητας της ιδιοκατασκευής από απλά εργαλεία και υλικά, όπως το ξύλο, ο χάλυβας και ο χαλκός, χωρίς να προϋποθέτει κάποια ιδιαίτερη εμπειρία. Επίσης, έχει μεγάλη απόδοση και μηδενική ροπή ευθυγράμμισης λόγω της απουσίας πυρήνα στο στάτη, γεγονός που της επιτρέπει να εκκινεί σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου. Πολύ σημαντικό είναι επίσης, πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εκπαιδευτικούς σκοπούς, όπου μέσα από την κατασκευή και την χρήση της, μπορούν μαθητές και φοιτητές να κατανοήσουν βασικές έννοιες της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, των ηλεκτρικών μηχανών και της αεροδυναμικής.

1.2.3 Η ενδιάμεση τεχνολογία

Σχεδιασμός βασισμένος στην ενδιάμεση τεχνολογία

Η ενδιάμεση τεχνολογία (intermediate technology) ή αλλιώς η «κατάλληλη» τεχνολογία (appropriate technology), είναι ένας τρόπος αντίληψης της τεχνολογίας ως μία ενεργή συνιστώσα στην καθημερινή διαμόρφωση των κοινωνικών σχέσεων. Εμπεριέχει την αντίληψη, πως οι ανθρώπινες κοινωνίες χρειάζεται να έχουν τη δυνατότητα να αποφασίζουν άμεσα για το μέλλον τους σύμφωνα με τις ιδιαιτερότητές τους και πως η ενδιάμεση τεχνολογία μπορεί να τις ενδυναμώσει προς την κατεύθυνση αυτή. [15]

Οι εφαρμογές ενδιάμεσης τεχνολογίας, με βάση το Consortium for Sustainable Village-Based Development [16], έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- **Απαιτούν μικρό αρχικό κεφάλαιο:** Το κόστος των πρώτων υλών για μια μικρή ανεμογεννήτρια είναι περίπου 600 ευρώ, χωρίς να συμπεριλαμβάνεται το κόστος του ιστού.
- **Δίνουν έμφαση στην χρήση τοπικών πρώτων υλών, έτσι ώστε να μειωθεί το κόστος και τα προβλήματα ανεφοδιασμού:** Τα υλικά της ανεμογεννήτριας, καθώς και της γεννήτριας είναι ξύλο, χάλυβας, ρητίνη, χαλκός και μαγνήτες νεοδυμίου. Όλα τα υλικά μπορούν να βρεθούν τοπικά εκτός από τους μαγνήτες.
- **Είναι πιο παραγωγικές από πολλές παραδοσιακές τεχνολογίες, αν και χρειάζονται σχετικά εντατική εργασία κατά την κατασκευή τους.**

- **Είναι αρκετά μικρές σε κλίμακα, έτσι ώστε να είναι οικονομικά προσιτές σε οικογενειακό ή κοινοτικό επίπεδο:** Αυτού του τύπου η Α/Γ μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα οικιακό σύστημα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, είτε σε DC σύστημα για τη φόρτιση συσσωρευτών είτε σε AC σύστημα στα πλαίσια ενός κοινοτικού μικροδικτύου.
- **Είναι δυνατή η κατανόηση της λειτουργίας τους, ο έλεγχός τους και η συντήρησή τους από τους ανθρώπους που χρησιμοποιούν την τεχνολογία χωρίς εξειδικευμένη εκπαίδευση:** Η συγκεκριμένη κατασκευή έχει υλοποιηθεί σε πολλά μέρη του κόσμου με τη μορφή ολιγοήμερου πρακτικού και θεωρητικού σεμιναρίου, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα κατανόησης, ελέγχου και συντήρησης στους χρήστες.
- **Μπορεί να παραχθεί η τεχνολογία σε μικρές βιοτεχνίες ή εργαστήρια χωριών και κοινοτήτων.**
- **Προϋποθέτουν τη συλλογική εργασία της κοινότητας για τη βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης.**
- **Προσφέρουν ευκαιρίες για τη συμμετοχή του τοπικού πληθυσμού σε αλλαγές και βελτιώσεις της τεχνολογίας και της διαδικασίας παραγωγής της:**
- **Είναι ευέλικτες και μπορούν να προσαρμοστούν σε διαφορετικά μέρη και σε μεταβαλλόμενες συνθήκες:** Η ανεμογεννήτρια μπορεί να σχεδιαστεί για σύνδεση σε AC ή DC σύστημα και για διαφορετικές τιμές ονομαστικής ισχύος. Επίσης, υπάρχει πληθώρα εναλλακτικών υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όπως π.χ. ο κέδρος για την κατασκευή των πτερυγίων, δίνοντας έτσι έμφαση σε τοπικά υλικά που βρίσκονται σε αφθονία.
- **Μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην παραγωγή χωρίς να προκαλούν βλάβες στο περιβάλλον:** Η χρήση και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μια ανανεώσιμη πηγή, όπως είναι ο άνεμος, μειώνει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικές ρυπογόνες μορφές. Βέβαια, κατά την παραγωγή ορισμένων υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή της Α/Γ, προκαλούνται ρύποι (π.χ. στην παραγωγή χάλυβα) και επίσης χρησιμοποιούνται ορισμένα χημικά υλικά και παράγωγα πετρελαίου, όπως η πολυεστερική ρητίνη.

Κοινωνικές, οικονομικές και πολιτικές προεκτάσεις

Οι κοινωνικές, οικονομικές και πολιτικές προεκτάσεις της ενδιάμεσης τεχνολογίας μπορούν να συγκεντρωθούν στα εξής σημεία [15]:

- Επιτρέπει την αποτελεσματικότερη ικανοποίηση των τοπικών αναγκών, γιατί οι τοπικές κοινωνίες είναι ενεργά εμπλεκόμενες στον προσδιορισμό τους και στην πραγματοποίηση των απαιτούμενων εργασιών για την ικανοποίησή τους. Για τους ίδιους λόγους είναι πιο πιθανό αυτή η τεχνολογία να είναι εναρμονισμένη με τις τοπικές παραδόσεις και αξίες.
- Συνεισφέρει στην ανάπτυξη εργαλείων που διευρύνουν την ανθρώπινη εργασία και τις ανθρώπινες δεξιότητες, σε αντίθεση με την ανάπτυξη μηχανών που υποκαθιστούν την ανθρώπινη εργασία και εξαλείφουν τις ανθρώπινες δεξιότητες.
- Αντιπροσωπεύει μια εύκολα αντιληπτή και ελεγχόμενη κλίμακα δραστηριοτήτων, οργάνωσης και σφαλμάτων, στην οποία άνθρωποι χωρίς εκπαίδευση στην οργάνωση και τη διοίκηση μπορούν να συνεργαστούν και να κατανοήσουν αυτό που κάνουν.
- Επιτρέπει την οικονομικότερη λειτουργία αρκετών διαδικασιών, ελαχιστοποιώντας την ανάγκη μεταφοράς υλικών σε μια περίοδο που το κόστος της ενέργειας είναι αυξημένο, προκαλώντας μεγαλύτερη αλληλεπίδραση ανάμεσα στην τοπική βιομηχανία και επιτρέποντας μεγαλύτερη χρήση τοπικών πρώτων υλών και ανθρώπινου δυναμικού.
- Καθιστά μη αναγκαίες πολλές ακριβές ή μη διαθέσιμες υπηρεσίες, όπως την εύρεση οικονομικών πόρων, την εκπαίδευση, τη διαφήμιση, τη διοίκηση και την παροχή ενέργειας. Αποφεύγει την έλλειψη ελέγχου από την τοπική κοινωνία, που συνήθως συνεπάγεται η χρήση τέτοιων εξωτερικών υπηρεσιών.
- Βοηθάει στην εγκαθίδρυση μιας αυτό-συντηρούμενης και συνεχώς επεκτάσιμης δεξαμενής δεξιοτήτων στην κοινότητα, που βασίζεται σε ήδη υπάρχουσες δεξιότητες.
- Παρέχει ένα μαξιλάρι ασφαλείας απέναντι στις επιρροές εξωτερικών οικονομικών αλλαγών, όπως π.χ. είναι η κατάρρευση της παγκόσμιας αγοράς ζάχαρης ή η ξαφνική μη διαθεσιμότητα φυτοφαρμάκων.
- Βοηθάει στη μείωση της οικονομικής, κοινωνικής και πολιτικής εξάρτησης ανάμεσα σε άτομα, περιοχές και έθνη, αναγνωρίζοντας πως οι άνθρωποι μπορούν και θα κάνουν πράγματα για τις κοινότητές τους, εάν έχουν έναν τρόπο να τα υλοποιήσουν.

1.3 Μηχανές μονίμων μαγνητών

Οι μηχανές μονίμων μαγνητών αποτελούν μια τοπολογία όπου τα τυλίγματα του δρομέα αντικαθίστανται από μόνιμους μαγνήτες που παράγουν σταθερή ροή με αποτέλεσμα να μην παρουσιάζουν τις απώλειες χαλκού των τυλιγμάτων διέγερσης, γεγονός που οδηγεί σε υψηλότερη απόδοση. Η μαγνητική ενέργεια που αποθηκεύουν στο εσωτερικό τους οι μόνιμοι μαγνήτες και το μόνιμο πεδίο διέγερσης που δημιουργούν συνεισφέρουν στην περαιτέρω αύξηση της απόδοσης της μηχανής και τη μείωση του μεγέθους της. Μειονέκτημά τους αποτελεί ο πολύπλοκος έλεγχος και η μόνιμη τιμή μαγνήτισης τους, που καθιστά δύσκολο τον έλεγχο της διέγερσης. Οι μηχανικές καταπονήσεις, όπως και η αύξηση της θερμοκρασίας για τον περιορισμό του πεδίου, μπορεί να οδηγήσουν σε απομαγνήτιση των μονίμων μαγνητών, καταστρέφοντας τη μηχανή.

Παρόλο που οι μηχανές μονίμων μαγνητών είναι εδώ και αρκετό καιρό γνωστές, δεν ήταν ιδιαίτερα διαδεδομένες λόγω της χαμηλής ποιότητας των μαγνητών. Ωστόσο, η βελτίωση των μαγνητικών υλικών, η εισαγωγή των μαγνητών νεοδυμίου (NdFeB) και η πρόοδος των ηλεκτρονικών ισχύος τις επανέφεραν στο προσκήνιο. Στην ανάπτυξη αυτού του είδους των μηχανών συνέβαλε και η αυξανόμενη διαθεσιμότητα και η συνεχής μείωση του κόστους των μονίμων μαγνητών.

Οι μηχανές μονίμων μαγνητών κατηγοριοποιούνται με βάση την κατεύθυνση της μαγνητικής ροής του πεδίου, οπότε προκύπτουν οι εξής κατηγορίες:

- **Αξονικής ροής (AFPM):** Η μαγνητική ροή που παράγεται από τους μόνιμους μαγνήτες είναι κάθετη στην ακτίνα της μηχανής και διέρχεται από το διάκενο, ακτινικά στα τυλίγματα του στάτη για να κλείσει το μαγνητικό κύκλωμα. Η μηχανή διαθέτει δισκοειδή δομή.
- **Ακτινικής ροής (RFPM):** Η μαγνητική ροή είναι παράλληλη στην ακτίνα της μηχανής, η οποία είναι κυλινδρικής δομής.
- **Επιφανειακών μονίμων μαγνητών:** Τα τυλίγματα του στάτη μοιάζουν πολύ με τα τυλίγματα της μηχανής επαγωγής, τα οποία βρίσκονται στην επιφάνεια του πυρήνα του στάτη. Οι μόνιμοι μαγνήτες είναι κολλημένοι στην επιφάνεια του πυρήνα του δρομέα. Η μηχανή μπορεί να στρέφεται από εξωτερική πηγή και τα τυλίγματα του στάτη παράγουν συμμετρικές τριφασικές ημιτονοειδείς τάσεις. Σε αυτόν το σχεδιασμό οι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι στο διάκενο της μηχανής, με αποτέλεσμα να είναι συνεχώς εκτεθειμένοι στις αρμονικές του στάτη και να παράγουν δινορρέυματα όταν έχουμε μεταβλητές στροφές.
- **Εμφυτευμένων μαγνητών:** Οι μόνιμοι μαγνήτες βρίσκονται εμφυτευμένοι στο εσωτερικό του δρομέα. Με αυτήν την κατασκευή οι μαγνήτες είναι προστατευμένοι στο εσωτερικό από τις υψηλές αρμονικές των πόλων και είναι εφικτή η επίτευξη υψηλότερων ταχυτήτων περιστροφής σε σχέση με αυτές των επιφανειακών, λόγω της συμπαγούς δομής τους.

Ένας άλλος διαχωρισμός των μηχανών μονίμων μαγνητών είναι με κριτήριο την κατανομή της πυκνότητας της μαγνητικής ροής και της καμπύλης του ρεύματος διέγερσης, οπότε προκύπτουν οι εξής κατηγορίες:

- **Σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών:** Σε αυτήν την κατασκευή η μαγνητική ροή και τα τυλίγματα του στάτη κατανέμονται ημιτονικά.
- **Σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη συνεχούς ρεύματος χωρίς ψύκτρες:** Η κατανομή της μαγνητικής ροής στο διάκενο αυτής της περίπτωσης είναι ορθογωνική, όπως και οι κυματομορφές του ρεύματος, ενώ τα τυλίγματα του στάτη είναι συγκεντρωμένα.

1.4 Σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών αξονικής ροής

Οι δύο πιο διαδεδομένοι τύποι σύγχρονων μηχανών μονίμων μαγνητών είναι οι αξονικής και οι ακτινικής ροής. Σε σύγκριση με τις μηχανές ακτινικής ροής, οι αντίστοιχες αξονικής ροής άργησαν ιδιαίτερα να χρησιμοποιηθούν για τους εξής λόγους:

- Ανάπτυξη υψηλής ελκτικής δύναμης μεταξύ στάτη και δρομέα
- Δυσκολίες κατά κύριο λόγο στην κατασκευή του πυρήνα της μηχανής
- Υψηλό κόστος κατασκευής
- Δυσκολίες στην τελική συναρμολόγηση

Σε αντίθεση όμως με τις μηχανές ακτινικής ροής, διαθέτουν τα εξής πλεονεκτήματα:

- Ο λόγος της διαμέτρου του πυρήνα προς το μήκος του άξονα περιστροφής είναι πολύ μεγάλος. Κατά συνέπεια, οι μηχανές αξονικής ροής αερίζονται και ψύχονται πιο εύκολα, χωρίς εξωτερική βοήθεια.
- Λόγω της δισκοειδούς δομής της η ρύθμιση του διακένου καθίσταται ευκολότερη.
- Δυνατότητα αύξησης της πυκνότητας ισχύος, το οποίο επιτυγχάνεται περιορίζοντας το υλικό του πυρήνα.
- Πολλοί δίσκοι μπορούν να συνδυαστούν για την επίτευξη υψηλότερης ισχύος ή ροπής.
- Μεγαλώνοντας την εξωτερική διάμετρο του πυρήνα είναι δυνατή η εγκατάσταση μεγαλύτερου αριθμού πόλων και επομένως γίνεται δυνατή η χρήση της μηχανής σε εφαρμογές υψηλής συχνότητας ή χαμηλής ταχύτητας.

Αξίζει να σημειωθεί πως η μηχανή αξονικής ροής αποδίδει την ίδια ροπή με αυτήν της ακτινικής ροής, χρησιμοποιώντας λιγότερο ενεργό υλικό, συνεπώς είναι πιο οικονομική. Σύμφωνα με το [4], οι μηχανές ακτινικής και αξονικής ροής επιδεικνύουν διαφορετική συμπεριφορά στη μεταξύ τους σύγκριση με βάση τα εξής δύο κριτήρια:

- I. **Το λόγο μήκους (length ratio) των μηχανών ακτινικής ροής:** Ορίζεται ως ο λόγος του αξονικού μήκους του στάτη προς τη διάμετρο του διακένου:

$$k_1 = \frac{l_{eff,RF}}{D_{gap}} \quad (1.1)$$

Συγκεκριμένα, όταν $k_1 < 0.5$ η αντίστοιχη μηχανή αξονικής ροής εμφανίζεται πιο συμφέρουσα λόγω μικρότερου όγκου.

- II. **Τον αριθμό των πόλων:** Για μικρό αριθμό πόλων ($P < 4$) προτιμώνται οι μηχανές ακτινικής ροής.

Συγκρίνοντας τα δύο αυτά είδη μηχανών με κριτήριο το κόστος, την απόδοση ή την ευκολία κατασκευής τους, για μικρό αριθμό πόλων ($P < 6$) η μηχανή ακτινικής ροής προτιμάται, ενώ για μεγαλύτερο αριθμό πόλων η χρήση μηχανής αξονικής ροής είναι πιο συμφέρουσα. Συγκεκριμένα, το κόστος για τους μόνιμους μαγνήτες είναι γενικά μικρότερο για τις μηχανές αξονικής ροής λόγω του μικρότερου διακένου σε αντίθεση με το κόστος του χαλκού που είναι μεγαλύτερο, καθώς απαιτούνται περισσότερες σπείρες. Με τη χρήση της μηχανής αξονικής ροής επιτυγχάνεται συνολικά μικρότερος όγκος, κάτι που είναι χρήσιμο σε περίπτωση που θέλουμε μικρό μήκος άξονα.

1.4.1 Τοπολογίες

Οι ποικίλες τοπολογίες των μηχανών αξονικής ροής μονίμων μαγνητών μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής [4]:

- I. Μηχανές μονής πλευράς (Μονός δρομέας-Μονός στάτης)

- Με πυρήνα σιδήρου με άυλακες
- Με πυρήνα σιδήρου χωρίς άυλακες
- Χωρίς πυρήνα σιδήρου

- II. Μηχανές διπλής πλευράς

1. Διπλός δρομέας-Μονός στάτης (εσωτερικός)

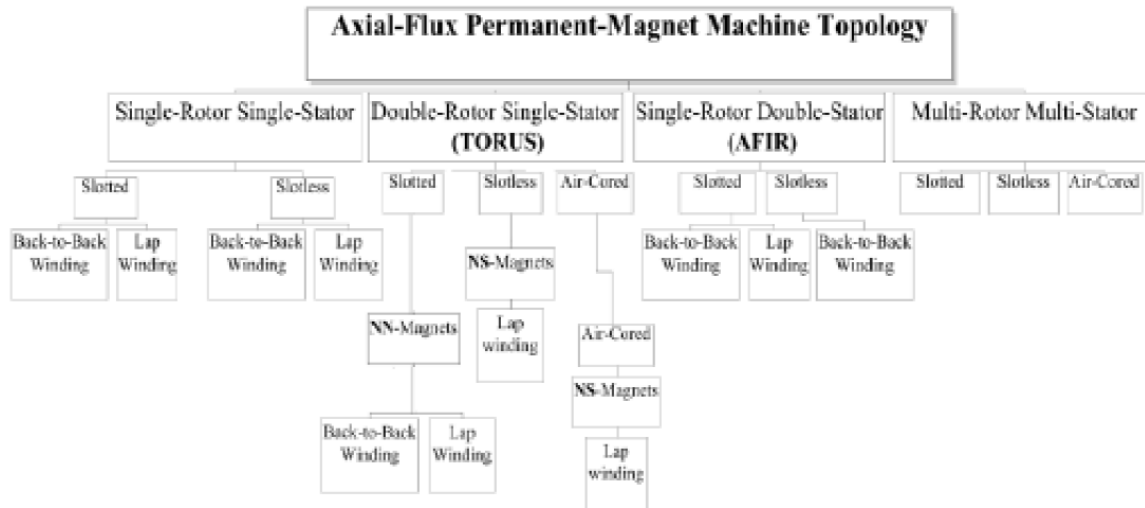
- Με πυρήνα σιδήρου στο στάτη και με άυλακες
- Με πυρήνα σιδήρου στο στάτη χωρίς άυλακες
- Χωρίς πυρήνα σιδήρου

2. Διπλός στάτης-Μονός δρομέας (εσωτερικός)

- Με πυρήνα σιδήρου στο στάτη και με άυλακες
- Με πυρήνα σιδήρου στο στάτη χωρίς άυλακες

- Χωρίς πυρήνα σιδήρου

3. Πολλαπλών δίσκων



Σχήμα 1.1: Διάφορες διατάξεις μηχανών αξονικής ροής και τα πιθανά τυλίγματα.

Προτού παρουσιαστεί η διάταξη που επιλέχθηκε για ανάλυση στην παρούσα εργασία, είναι σημαντικό να γίνει αναφορά σε δύο χαρακτηριστικά των μηχανών αυτών που παίζουν σημαντικό ρόλο στην τελική τους διαμόρφωση, τον πυρήνα και τις αύλακες:

- **Πυρήνας:** Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, υπάρχουν μηχανές με και χωρίς πυρήνα. Ανυπαρξία πυρήνα σημαίνει ανυπαρξία απωλειών υστέρησης και δινορρευμάτων, που συνεπάγεται υψηλότερη απόδοση της μηχανής και γραμμική σχέση ροπής-ρεύματος. Επιπλέον, η εκκίνηση της μηχανής καθίσταται ευκολότερη και η κατασκευή της ελαφρύτερη, λόγω της απουσίας ροπής ευθυγράμμισης και ελκτικών δυνάμεων μεταξύ δρομέα και στάτη. Ωστόσο, η έλλειψη πυρήνα συνεπάγεται μεγαλύτερους μαγνήτες στη γεννήτρια, καθώς ο πυρήνας είναι αυτός που ουσιαστικά ενισχύει το πεδίο. Μεγαλύτεροι μαγνήτες οδηγούν όχι μόνο σε υψηλότερο κόστος κατασκευής της μηχανής, καθώς το κόστος τους είναι ιδιαίτερα υψηλό, αλλά και σε δυσκολότερη ψύξη της μηχανής, κάτι ωστόσο το οποίο δεν είναι σημαντικό πρόβλημα για τις μηχανές αξονικής ροής.
- **Αύλακες:** Εφόσον υπάρχει πυρήνας, μπορούν να υπάρξουν μηχανές με ή χωρίς αύλακες. Η παρουσία αυλάκων στη μηχανή προσφέρει μηχανική υποστήριξη στο τύλιγμα το οποίο περνάει διαμέσου αυτών. Το μεγάλο πλεονέκτημα των αυλάκων είναι ότι μειώνουν το διάκενο, φέρνοντας πιο κοντά το σίδηρο στους μαγνήτες και οδηγώντας σε ενίσχυση του μαγνητικού πεδίου. Κατ' αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ροπή με τους ίδιους μαγνήτες. Ως αποτέλεσμα της παρουσίας των

αυλάκων, μπορεί να θεωρηθεί η μείωση του όγκου των μαγνητών και, κατά συνέπεια, του κόστους της μηχανής.

Το μειονέκτημα της παρουσίας αυλάκων είναι η δημιουργία ροπής ευθυγράμμισης, η οποία οφείλεται στα «δόντια». Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στο γεγονός ότι οι μαγνήτες έλκονται περισσότερο από το σίδηρο όταν περνούν μπροστά από τις αύλακες απ' ότι όταν περνούν από το διάκενο μεταξύ των αυλάκων. Η ροπή ευθυγράμμισης δυσκολεύει γενικά την εκκίνηση της γεννήτριας, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις χαμηλών ανέμων σε αιολικές εφαρμογές, καθώς το σύστημα τείνει να ευθυγραμμιστεί. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί σε μείωση της απόδοσης, ενώ προκαλεί θόρυβο και δονήσεις στη μηχανή.

1.4.2 Επιλεγόμενη τοπολογία

Συνοπλοποιώντας όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως, η τοπολογία που επιλέχθηκε να αναλυθεί είναι γεννήτρια διπλού δρομέα-μονού στάτη χωρίς πυρήνα σιδήρου. Ο διπλός δρομέας φέρει μαγνήτες και στις δύο πλευρές του. Κάθε μαγνήτης έχει αντίθετη πολικότητα από τον απέναντι και τον διπλανό του. Το τύλιγμα, το οποίο μπορεί να είναι είτε διανεμημένο είτε συγκεντρωμένο, τοποθετείται σε διαμαγνητικό, μη αγώγιμο στάτη από ρητίνη. [15,17,18]

Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό αυτής της τοπολογίας είναι η απουσία πυρήνα. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η απουσία πυρήνα αυξάνει την απόδοση της μηχανής, διότι εξαλείφονται οι απώλειες υστέρησης και δινορρευμάτων. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι επίσης η δυνατότητα εκκίνησης της γεννήτριας σε χαμηλούς ανέμους και η επακόλουθη εκμετάλλευσή τους, εξαιτίας της απουσίας ροπής ευθυγράμμισης. Τέλος, η δυνατότητα εύκολης κατασκευής της μηχανής αντισταθμίζει το υψηλότερο κόστος κατασκευής, λόγω του αυξημένου μεγέθους των μαγνητών.

1.5 Μέθοδοι μέτρησης και ανάλυσης των θερμικών φαινομένων

Η θερμική ανάλυση στις ηλεκτρικές μηχανές έχει ως στόχο την αναπαράσταση της λειτουργίας τους, μέσω ενός μοντέλου για την επαρκή γνώση της θερμικής συμπεριφοράς τους. Πληροφορίες για τη μεταφορά της θερμότητας, καθώς και για το ρυθμό μεταφοράς αυτής, είναι απαραίτητες πριν τη λειτουργία και τις πειραματικές μετρήσεις. Η προσομοίωση δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα όταν το θεωρητικό μοντέλο που χρησιμοποιείται περιέχει όσο το δυνατόν περισσότερες παραμέτρους, που χαρακτηρίζουν τη μηχανή στην πραγματικότητα. Η αναλυτική επίλυση αυτού του θερμικού προβλήματος θα ήταν αρκετά δύσκολη και χρονοβόρα λόγω των περίπλοκων μαθηματικών υπολογισμών. Επομένως, καθίσταται αναγκαία η χρήση του μοντέλου των συγκεντρωμένων παραμέτρων και της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων

ANSYS. Για το μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων, λόγω της μαθηματικής του πολυπλοκότητας, χρησιμοποιείται ένας άλλος τρόπος προσέγγισης του θερμικού προβλήματος, ο οποίος είναι ταχύτερος και απλούστερος και του οποίου η ακρίβεια παραμένει σε ικανοποιητικά επίπεδα. Ο νέος αυτός τρόπος προσέγγισης είναι η εξαγωγή ενός θερμικού ισοδύναμου κυκλώματος μέσω της μεθόδου των συγκεντρωμένων παραμέτρων, η επίλυση του οποίου δεν είναι τόσο πολύπλοκη. Τα αποτελέσματα της μεθόδου δίνουν θερμοκρασίες σε σημεία ενδιαφέροντος της μηχανής.

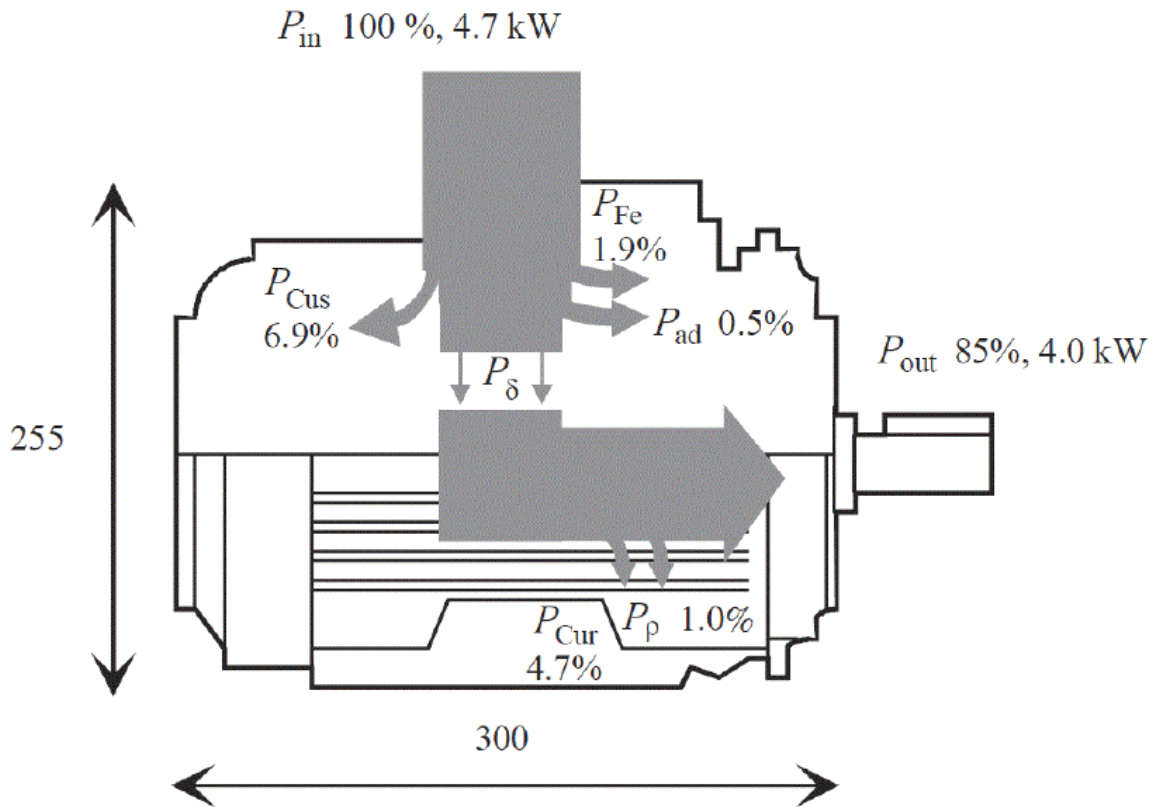
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας θα συγκριθούν με πειραματικές μετρήσεις που ελήφθησαν στο εργαστήριο. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές μέθοδοι, ένας αισθητήρας θερμότητας PT 100 στο τύλιγμα του χαλκού, άλλος ένας ίδιου τύπου στην επιφάνεια του στάτη και ένα ψηφιακό θερμόμετρο με υπέρυθρες ακτίνες laser. Αυτές οι θερμικές επαφές κατασκευάζονται από ημιαγώγιμα υλικά, έχουν μεγάλο συντελεστή θερμοκρασίας, είναι χημικά σταθερά, δεν επηρεάζονται από την γήρανση του υλικού και έχουν μικρή μηχανική αντοχή. Τέλος, ένας αισθητήρας θερμότητας PT 100 χρησιμοποιήθηκε και για τη λήψη μετρήσεων στην επιφάνεια του στάτη μιας γεννήτριας τοποθετημένης σε πεδίο δοκιμών, με σκοπό την εξέταση της λειτουργίας της υπό κανονικές συνθήκες.

Κεφάλαιο 2: Θερμικά Φαινόμενα

2.1 Γενικά

Η παραγωγή και η μετάδοση θερμότητας και η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στις ηλεκτρικές μηχανές αποτελούν ξεχωριστό πεδίο προβληματισμού των σχεδιαστών και κατασκευαστών τους. Οι μεταβολές της θερμοκρασίας επηρεάζουν αρνητικά σε μεγάλο βαθμό την απόδοση και τη διάρκεια ζωής των μηχανών, γεγονός που τις καθιστά μη αμελητέες. Αντικείμενο μελέτης αποτελούν τα θερμικά φαινόμενα, η ψύξη και ο έλεγχος των μηχανών, με σκοπό την αντιμετώπιση και βελτίωσή τους. Πέρα από τη μηχανή αυτήν καθ' αυτήν, οι υψηλές θερμοκρασίες επιδρούν και σε ηλεκτρονικά ή μηχανικά συστήματα που βρίσκονται κοντά σε αυτές.

Η μελέτη και διερεύνηση της θερμικής συμπεριφοράς των ηλεκτρικών μηχανών πραγματοποιείται με στόχο τη γνώση και την πρόβλεψη των τιμών της θερμοκρασίας σε κάθε σημείο της μηχανής. Κατά τη λειτουργία μιας ηλεκτρικής μηχανής παράγεται θερμότητα, η οποία οφείλεται πρωτίστως σε απώλειες ισχύος στα ηλεκτρικά και μαγνητικά κυκλώματα της μηχανής, δηλαδή στις απώλειες χαλκού των κυκλωμάτων του στάτη και του δρομέα και τις απώλειες σιδήρου ή δινορρευμάτων, και δευτερευόντως σε μηχανικές απώλειες (απώλειες περιστροφής). Οι μηχανικές απώλειες που παρατηρούνται στις ηλεκτρικές μηχανές διακρίνονται σε απώλειες λόγω τριβής από τα περιστρεφόμενα μέρη και απώλειες εξαιρισμού λόγω του αέρα στο διάκενο. Οι απώλειες τριβής εξαρτώνται από την ταχύτητα του άξονα, από τον τύπο του ρουλεμάν και τις ιδιότητες του λιπαντικού που χρησιμοποιείται. Οι ακραίες επιφάνειες του δρομέα προκαλούν επίσης απώλειες τριβής. Επιπλέον, παρατηρούνται απώλειες λόγω αντιστάσεων στους αγωγούς που χρησιμοποιούνται, οι οποίες ονομάζονται απώλειες Joule και ενσωματώνονται στις απώλειες χαλκού. Κατ' αυτόν τον τρόπο, οι απώλειες της μηχανής μπορούν να θεωρηθούν ως οι κυριότερες πηγές θερμότητας σε αυτήν. Το Σχήμα 2.1 απεικονίζει το ισοζύγιο ισχύος ενός τυπικού κλειστού τύπου επαγωγικού κινητήρα 4kW [21]:



Σχήμα 2.1: Ισοζύγιο ισχύος κινητήρα 4 kW.

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία οι απώλειες χαλκού θα θεωρηθούν ως η κύρια πηγή θερμότητας.

Για να εξασφαλιστεί η μακροβιότητα της μηχανής, οι απώλειες αυτές πρέπει να απομακρυνθούν όσο το δυνατόν περισσότερο από τη μηχανή, έτσι ώστε να τηρούνται οι θερμοκρασιακοί περιορισμοί, οι οποίοι θα αναφερθούν παρακάτω, που προβλέπονται για τα υλικά της μηχανής, όπως τα μονωτικά υλικά και οι μόνιμοι μαγνήτες. Συν τοις άλλοις, χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας μειώνουν τις απώλειες στα τυλίγματα που εισάγονται από το θερμοκρασιακό συντελεστή της ηλεκτρικής αντίστασης.

2.2 Για τις μηχανές μονίμων μαγνητών αξονικής ροής

Παρά το γεγονός πως εκτεταμένη έρευνα έχει αφιερωθεί στη θερμική ανάλυση των συμβατικών ηλεκτρικών μηχανών, οι μηχανές αξονικής ροής μονίμων μαγνητών έχουν μελετηθεί πολύ λιγότερο. Λόγω του γεγονότος ότι διαθέτουν ένα σχετικά μεγάλο διάκενο αέρος, το οποίο σε αρκετές περιπτώσεις είναι πολλαπλό, η γενική αντίληψη είναι ότι οι γεννήτριες αξονικής ροής μονίμων μαγνητών διαθέτουν πολύ καλύτερη ικανότητα αερισμού από τις αντίστοιχες ακτινικής ροής. [19,20]

Καθώς η εξωτερική διάμετρος αυξάνεται σχετικά αργά σε σχέση με την αύξηση της ισχύος εξόδου, όπως προκύπτει από τον τύπο [20]:

$$D_{out} \propto \sqrt[3]{P_{out}} \quad (2.1)$$

Η υπάρχουσα ικανότητα απαγωγής θερμότητας μπορεί να είναι ανεπαρκής όσον αφορά στην αντιμετώπιση υπερβολικής θερμότητας σε συγκεκριμένες βαθμίδες ισχύος, με αποτέλεσμα να χρειάζεται η εφαρμογή αποδοτικότερων τρόπων ψύξης.

2.3 Μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας

Η μετάδοση θερμότητας είναι ένα φαινόμενο που αφορά την παραγωγή, τη μετατροπή και την ανταλλαγή θερμικής ενέργειας και θερμότητας μεταξύ φυσικών συστημάτων. Απαραίτητη προϋπόθεση για την ύπαρξη αυτού του φαινομένου είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ δύο σωμάτων. Ανάλογα με το ρυθμό και τον τρόπο μεταφοράς, η μεταφορά θερμότητας ταξινομείται σε διάφορους μηχανισμούς, οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη τη διαφορά θερμοκρασίας, τη μεταφορά μάζας, την πίεση, καθώς και πολλούς άλλους συντελεστές για τη λεπτομερή και ακριβή περιγραφή του φαινομένου.

Η θερμότητα μεταδίδεται από ένα σώμα σε ένα άλλο, και κατ' επέκταση από ένα σύστημα σε ένα άλλο, με τους εξής μηχανισμούς:

- Αγωγή
- Συναγωγή
- Ακτινοβολία

2.3.1 Αγωγή

Θερμική αγωγιμότητα, ή αλλιώς διάχυση, ονομάζεται η άμεση μικροσκοπική ανταλλαγή κινητικής ενέργειας των σωματιδίων, μέσω του ορίου μεταξύ των δύο συστημάτων. Όταν ένα αντικείμενο είναι σε διαφορετική θερμοκρασία από άλλο αντικείμενο ή το περιβάλλον του, η θερμότητα ρέει ώστε τα δύο συστήματα να φθάσουν στην ίδια θερμοκρασία, όπου θα βρίσκονται σε θερμική ισορροπία. Αυτή η αυθόρμητη μεταφορά θερμότητας λαμβάνει χώρα πάντα από μια περιοχή υψηλής θερμοκρασίας σε μια άλλη περιοχή χαμηλότερης θερμοκρασίας, και κατ' επέκταση από μια περιοχή υψηλότερης σε περιοχή χαμηλότερης ενέργειας, όπως προκύπτει από το νόμο του Fourier:

$$\Delta P_C = -kA \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{kA}{l} (T_{hot} - T_{cold}) \quad (2.2)$$

όπου ΔP_C είναι ο ρυθμός της θερμικής αγωγιμότητας, A η επιφάνεια όπου περνά η ροή, l το μήκος της διαδρομής που διατρέχει η ροή και $k = \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού. Η θερμική αγωγιμότητα προσδιορίζεται πειραματικά και δεν είναι

ιδιαίτερα ευαίσθητη σε θερμοκρασιακές μεταβολές. Συγκεκριμένα, μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο

$$\lambda = \lambda_0 \cdot (1 + \beta \cdot \Delta T) \quad (2.3)$$

όπου λ_0 είναι η τιμή του συντελεστή στη θερμοκρασία αναφοράς T_0 , β μια σταθερά που προσδιορίζεται πειραματικά και ΔT η διαφορά θερμοκρασίας από την κατάσταση αναφοράς.

Στον Πίνακα 2.1 δίνονται οι θερμικές ιδιότητες υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή μηχανών αξονικής ροής μονίμων μαγνητών [4]:

Material (20°C)	Grade	ρ kg/m ³	c_p J/(kg °C)	k W/(m °C)
Air	-	1.177	1005	0.0267
Water	-	1000	4184	0.63
Mica	-	3000	813	0.33
Epoxy resin	-	1400	1700	0.5
Copper	-	8950	380	360
Aluminum	Pure	2700	903	237
	Alloy (cast)	2790	883	168
Steel	1% Carbon	7850	450	52
	Silicon	7700	490	20-30
Permanent magnet	Sintered NdFeB	7600 to 7700	420	9

Πίνακας 2.1: Θερμικές ιδιότητες υλικών για μηχανή αξονικής ροής μονίμων μαγνητών.

Ο νόμος Fourier μας δίνει τη μεταφορά ενέργειας μέσω αγωγής τόσο για μονοδιάστατα όσο και για πολυδιάστατα προβλήματα. Στην περίπτωση που έχουμε μονοδιάστατο πρόβλημα, τότε ο νόμος του Fourier για τη μετάδοση της θερμότητας απλοποιείται με τον τύπο:

$$\vec{q} = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.4)$$

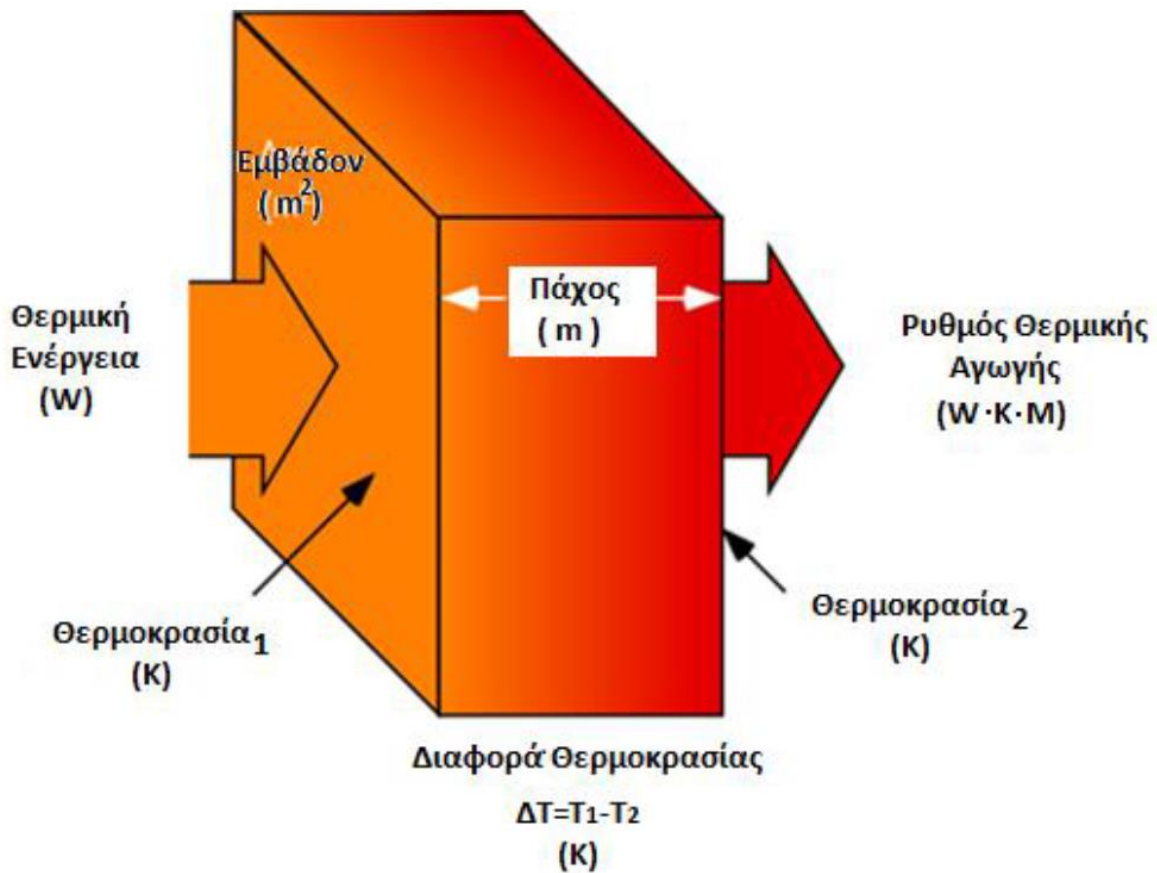
όπου με $q \left[\frac{W}{m^2} \right]$ συμβολίζουμε την πυκνότητα ροής της θερμότητας, η οποία είναι ανάλογη του αρνητικού γινομένου του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k και της κλίσης της θερμοκρασίας. Επομένως, αν η πυκνότητα θερμορροής ρέει προς μία κατεύθυνση μόνο, τότε η θερμορροή δίνεται από τον τύπο:

$$Q = A \cdot \vec{q} = -A \cdot k \frac{dT}{dx} \quad (2.5)$$

όπου $A [m^2]$ το εμβαδό της κάθετης επιφάνειας μέσω της οποίας παρατηρείται το φαινόμενο.

Θεωρώντας την περίπτωση όπου έχουμε αγωγή σε μόνιμη κατάσταση και η θερμοκρασία του ενός συστήματος δε μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου, γεγονός που απλοποιεί

ακόμη περισσότερο την ανάλυση, έχουμε: $\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L}$, όπου L το πάχος του τοιχώματος μέσω του οποίου γίνεται η μεταφορά θερμότητας, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2:



Σχήμα 2.2: Μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής σε μία διάσταση.

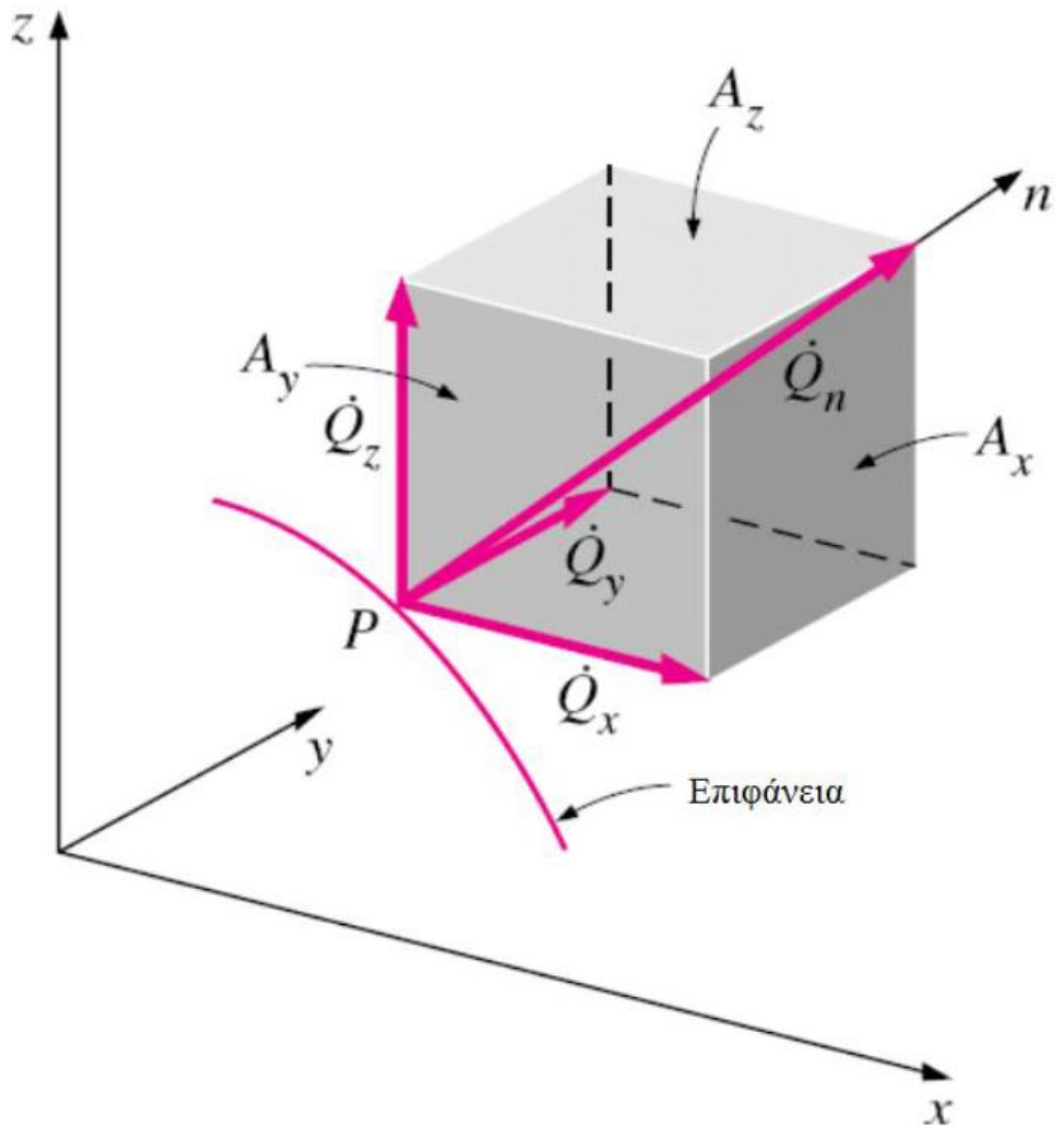
Συνεπώς, η ζητούμενη θερμοροή απλοποιήθηκε στον τύπο:

$$Q = -A \cdot k \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (2.6)$$

Στην περίπτωση τρισδιάστατου προβλήματος ο νόμος του Fourier γίνεται:

$$\vec{q}_n = -k \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2.7)$$

όπου n το διάνυσμα που είναι κάθετο στην ισοθερμοκρασιακή επιφάνεια όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3:



Σχήμα 2.3: Διάνυσμα πυκνότητας θερμορροής κάθετο σε μια επιφάνεια με 3 διαστάσεις.

Η ισοθερμοκρασιακή επιφάνεια είναι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων που έχουν την ίδια θερμοκρασία, μέσω του οποίου γίνεται η διάδοση της θερμότητας. Η θερμοκρασία T είναι συνάρτηση των τριών διαστάσεων και του χρόνου. Άρα, η πυκνότητα θερμορροής, αν αναλυθεί το διάνυσμα n , έχει την ακόλουθη μορφή σε καρτεσιανές συντεταγμένες:

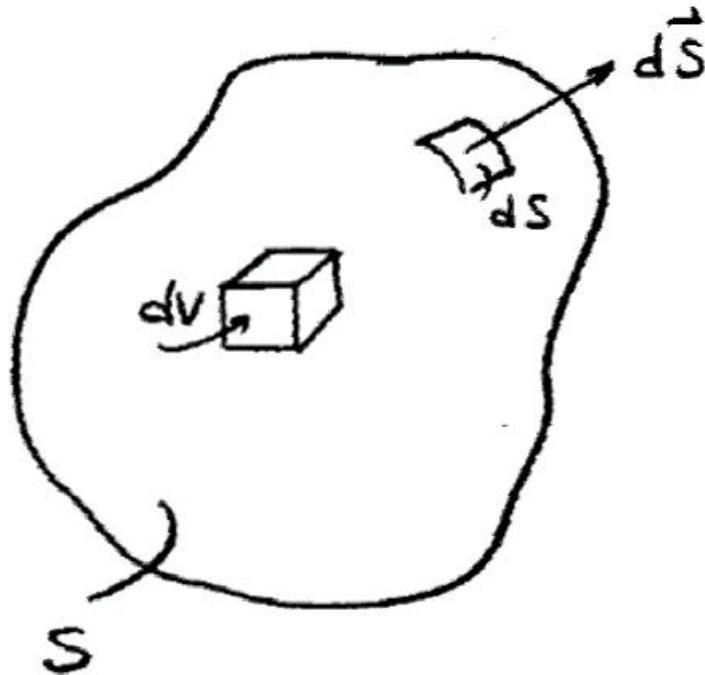
$$\vec{q}_n = -k \left[\hat{i}_x \frac{dT}{dx} + \hat{i}_y \frac{dT}{dy} + \hat{i}_z \frac{dT}{dz} \right] \quad (2.8)$$

Αν υποτεθεί σύστημα όγκου V και στο εσωτερικό υπάρχει πηγή θερμότητας με συνολική ισχύ Q_{in} και ο ρυθμός μεταφοράς της θερμότητας που εξέρχεται από τον όγκο V είναι Q_{out} , από την αρχή διατήρησης της ενέργειας προκύπτει:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = Q_{in} - Q_{out} \quad (2.9)$$

όπου με E συμβολίζεται η συνολική ενέργεια που περιέχεται στον όγκο V , ως κινητική ενέργεια των μορίων. Συμβολίζοντας με $q \left[\frac{W}{m^3} \right]$ τη συνολική ισχύ των πηγών θερμότητας ανά μονάδα όγκου, προκύπτει:

$$Q_{in} = \int_V q dV \quad (2.10)$$



Σχήμα 2.4: Εξεταζόμενος όγκος σε τρισδιάστατο πρόβλημα αγωγής.

Από το νόμο Fourier ο ρυθμός μεταφοράς της θερμότητας που εξέρχεται από τον όγκο V δίνεται από τον τύπο:

$$Q_{out} = \int_S \hat{i}_n \cdot (-k\nabla T) dS \quad (2.11)$$

και από θεώρημα Gauss προκύπτει:

$$Q_{out} = \int_V \nabla(k\nabla T) dV \quad (2.12)$$

Για να υπολογιστεί το ενεργειακό ισοζύγιο του τύπου (2.9) απαιτείται ο προσδιορισμός του ρυθμού μεταβολής της εσωτερικής ενέργειας. Αν θεωρήσουμε ότι $\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ η πυκνότητα και $c_p \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$ η ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού από το οποίο αποτελείται ο όγκος V , τότε προκύπτει:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \int_V \left(\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \right) dV \quad (2.13)$$

Από τους τύπους (2.9), (2.12), (2.13) προκύπτει:

$$\int_V (\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t}) dV = \int_V q dV + \int_V \nabla(\lambda \nabla T) dV \Leftrightarrow \nabla(\lambda \nabla T) + q = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.14)$$

Η εξίσωση (2.14) είναι η γενική εξίσωση θερμικής αγωγής για επίλυση ενός πολυδιάστατου προβλήματος. Μέσω αυτής της εξίσωσης περιγράφεται το ενεργειακό ισοζύγιο για κάθε σύστημα σε πολυδιάστατο χώρο για το μηχανισμό της θερμικής αγωγής. Στις ανωτέρω εξισώσεις ο συντελεστής αγωγιμότητας k είναι εξίσωση της θέσης και περιγράφεται από τους χωρικούς συντελεστές. Σε περίπτωση που είναι ανεξάρτητος της θέσης του υλικού στο οποίο βρίσκεται, τότε ο τύπος του ισοζυγίου απλοποιείται ως εξής:

$$k \cdot \nabla^2 T + q = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \Leftrightarrow \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q}{\lambda} = \frac{\rho}{\lambda} \cdot \frac{c_p}{\lambda} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.15)$$

2.3.2 Συναγωγή

Η διάδοση θερμότητας μέσω συναγωγής είναι η μεταφορά θερμότητας από μία επιφάνεια σε ένα ρευστό. Η συναγωγή είναι συνήθως η κυρίαρχη μορφή μεταφοράς θερμότητας σε υγρά και αέρια. Περιλαμβάνει τις συνδυασμένες διεργασίες της αγωγιμότητας (διάχυση θερμότητας) και οριζόντιας μεταφοράς (μεταφορά της θερμότητας με μαζική ροή ρευστού), παρόλο που θεωρείται συχνά ξεχωριστή μέθοδος μεταφοράς θερμότητας.

Ο όρος συναγωγή μπορεί να αναφέρεται στη μεταφορά θερμότητας με οποιαδήποτε κίνηση ρευστού, ωστόσο το φαινόμενο αυτό που οφείλεται μόνο στη συνολική ροή ρευστού περιγράφεται καλύτερα από τον όρο μεταγωγή. Η διαδικασία της μεταφοράς της θερμότητας από ένα στερεό σε ένα υγρό και αντίστροφα απαιτεί όχι μόνο τη μεταφορά της θερμότητας από το μεγαλύτερο μέρος της κίνησης του ρευστού, αλλά και τη διάχυση της θερμότητας μέσω του σταθερού ορίου δίπλα στο στερεό. Επομένως, ως συναγωγή ορίζεται η μεταγωγή και η διάχυση της ενέργειας που προέρχεται από τα ρευστά.

Η συναγωγή διακρίνεται και βάσει της ροής του ρευστού. Ελεύθερη ή φυσική συναγωγή ονομάζεται η ρευστή κίνηση που προκαλείται από τις δυνάμεις πλευστότητας που προκύπτουν από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας στο ρευστό. Απουσία εξωτερικής πηγής, τα μόρια διαχωρίζονται και διασκορπίζονται, όταν το ρευστό έρθει σε επαφή με μια θερμή επιφάνεια, με αποτέλεσμα το ρευστό να είναι λιγότερο πυκνό. Συνεπώς, θερμότητα μεταφέρεται από το θερμότερο όγκο του ρευστού στον ψυχρότερο. Σε ορισμένες περιπτώσεις, φυσικές δυνάμεις άνωσης είναι εξ ολοκλήρου υπεύθυνες για την κίνηση ρευστού, όταν αυτό θερμαίνεται. Όταν υπάρχουν διαφορές θερμοκρασίας μέσα στον όγκο του ρευστού, τότε έχουμε μεταφορά ενέργειας μέσα στο ρευστό. Στη φυσική συναγωγή, η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μια μείωση στην πυκνότητα, η οποία δημιουργεί ρευστή κίνηση λόγω των πιέσεων και των δυνάμεων, όταν υγρά διαφορετικών πυκνοτήτων επηρεάζονται από τη βαρύτητα (ή οποιαδήποτε g-force). Επιπλέον, υπάρχει η εξαναγκασμένη συναγωγή, η οποία προκύπτει από την κίνηση ενός ρευστού από μια εξωτερική πηγή, όπως ανεμιστήρες, με ανάδευση και αντλίες, δημιουργώντας μια τεχνητή ροή ρευσμάτων μεταφοράς. Τέλος, υπάρχει ο συνδυασμός φυσικής και εξαναγκασμένης

συναγωγής, όπου συνυπάρχουν οι δύο μορφές. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται όταν η ταχύτητα του ρευστού λόγω της εξαναγκασμένης ροής είναι μικρή και οι δυνάμεις άνωσης λόγω της φυσικής συναγωγής μεγάλες.

Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής δίνεται από το νόμο ψύξης του Νεύτωνα:

$$\Delta P_v = hA(T_{hot} - T_{cold}) \quad (2.16)$$

όπου h είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής, ο οποίος είναι μια περίπλοκη συνάρτηση της κατεύθυνσης της επιφάνειας, των ιδιοτήτων του ρευστού, της ταχύτητας και της θερμοκρασίας και προσδιορίζεται συνήθως πειραματικά. Ο συντελεστής h αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας του μέσου ψύξης σε σχέση με την επιφάνεια που ψύχεται. Για μια επιφάνεια με εξαναγκασμένο εξαερισμό, ισχύει ο ακόλουθος εμπειρικός τύπος [5]:

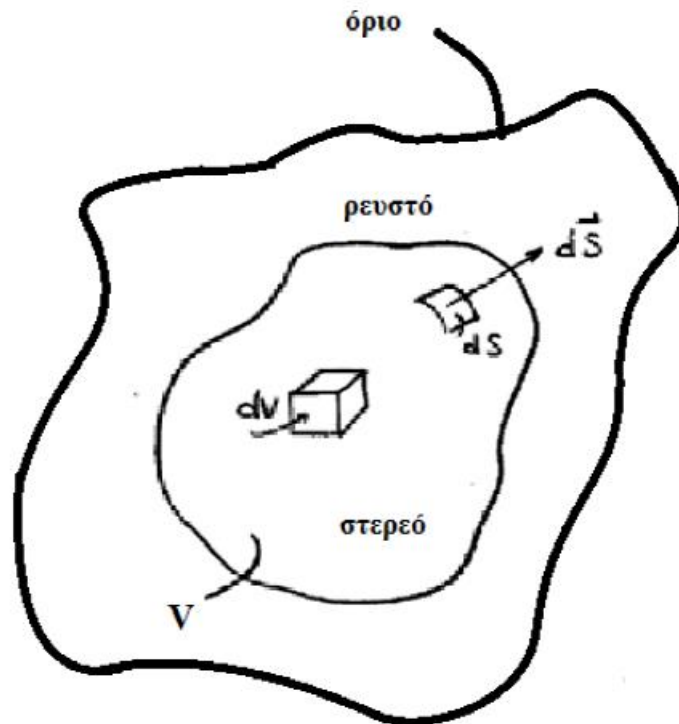
$$h_f = h_n(1 + c_h\sqrt{v}) \quad (2.17)$$

όπου h_f και h_n είναι οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας για εξαναγκασμένη και φυσική συναγωγή αντίστοιχα, v η γραμμική ταχύτητα του ψυκτικού μέσου και $c_h \in [0.5, 1.3]$ είναι ένας εμπειρικός συντελεστής. Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται μερικές χαρακτηριστικές τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής συναγωγής σε γνωστά ρευστά:

Ρευστό συναγωγής	Συντελεστής συναγωγής (W/m ² K)
Αέρας	5-25
Εξαναγκασμένη ροή αέρα	10-200
Νερό	20-100
Εξαναγκασμένη ροή νερού	50-10000
Λάδι	50-2000

Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικές τιμές συντελεστή αγωγής σε γνωστά ρευστά.

Αν θεωρηθούν δύο υλικά (συστήματα), ένα στερεό και ένα ρευστό, όπως στο Σχήμα 2.5, τα οποία έρχονται σε επαφή, τότε μέσω της αρχής διατήρησης της ενέργειας είναι δυνατός ο προσδιορισμός της σχέσης που περιγράφει τη μετάδοση θερμότητας μέσω συναγωγής.



Σχήμα 2.5: Συναγωγή θερμότητας μεταξύ επιφάνειας στερεού και ρευστού.

Αν τα δύο υλικά έρχονται σε επαφή μέσω μιας επιφάνειας S και συμβολιστεί η ροή της εξερχόμενης θερμότητας από την επιφάνεια των δύο υλικών ως Q_{out} [W], η συνολική ισχύς που παράγεται λόγω των πηγών θερμότητας που βρίσκονται στο εσωτερικό του στερεού ως Q_g και η ενέργεια του ρευστού και το υγρού ως E_1 και E_2 αντίστοιχα, για το στερεό προκύπτει:

$$\frac{\partial E_1}{\partial t} = Q_g - Q_{out,solid} \quad (2.18)$$

Αν η συνολική παραγόμενη από τις πηγές θερμότητας ισχύς ανά μονάδα όγκου του στερεού συμβολιστεί ως q $\left[\frac{W}{m^3}\right]$, η Q_g δίνεται από τον τύπο:

$$Q_g = \int_V q dV \quad (2.19)$$

Ο ρυθμός της εξερχόμενης θερμότητας από το στερεό στο ρευστό $Q_{out,solid}$ υπολογίζεται από το νόμο ψύξης του Νεύτωνα. Αν θεωρήσουμε T_{solid} τη θερμοκρασία της επιφάνειας επαφής των δύο υλικών και T_{fluid} τη θερμοκρασία του ρευστού κοντά στην επαφή, θα έχουμε:

$$Q_{out,solid} = \int_S \hat{i}_n \cdot \vec{q} dS \quad (2.20)$$

Δεδομένου ότι οι θερμοκρασίες T_{solid} και T_{fluid} είναι συναρτήσεις της θέσης στο χώρο και του χρόνου, προκύπτει:

$$Q_{out,solid} = \int_S h \cdot [T_{solid}(x, y, z, t) - T_{fluid}(x, y, z, t)] dS \quad (2.21)$$

Όπως και στην αγωγή, για να περιγράψουμε τη σχέση αρκεί να εκφράσουμε τη μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του στερεού $\frac{\partial E_1}{\partial t}$. Αν θεωρηθεί $\rho_{solid} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ η πυκνότητα και $c_{psolid} \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$ η ειδική θερμοχωρητικότητα του στερεού, τότε προκύπτει:

$$\frac{\partial E_1}{\partial t} = \int_V \left(\rho_{solid} \cdot c_{psolid} \cdot \frac{\partial T_{solid}(x, y, z, t)}{\partial t} \right) dV \quad (2.22)$$

Εν συνεχεία, από την εξίσωση της αρχής διατήρησης της ενέργειας στο στερεό υπολογίζουμε:

$$\begin{aligned} & \int_V \left(\rho_{solid} \cdot c_{psolid} \cdot \frac{\partial T_{solid}(x, y, z, t)}{\partial t} \right) dV \\ &= \int_V q dV - \int_S h \cdot [T_{solid}(x, y, z, t) - T_{fluid}(x, y, z, t)] dS \end{aligned} \quad (2.23)$$

Παρόμοια, για το ρευστό προκύπτει:

$$\frac{\partial E_2}{\partial t} = Q_{in} - Q_{out} \quad (2.24)$$

όπου Q_{in} είναι η θερμορροή που εισέρχεται στο ρευστό από το στερεό, Q_{out} η ισχύς που μεταφέρεται από το ρευστό προς το περιβάλλον και E_2 η ενέργεια των μορίων του ρευστού. Ωστόσο, η θερμορροή που εξέρχεται από το στερεό ισούται με αυτή που εισέρχεται στο ρευστό. Συνεπώς:

$$Q_{in} = Q_{out,solid} = \int_S h \cdot [T_{solid}(x, y, z, t) - T_{fluid}(x, y, z, t)] dS \quad (2.25)$$

Θεωρώντας την πυκνότητα και την ειδική θερμοχωρητικότητα του ρευστού όπως και για το στερεό $\rho_{fluid} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ και $c_{pfluid} \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$, τότε η μεταβολή της εσωτερικής του ενέργειας περιγράφεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\frac{\partial E_2}{\partial t} = \int_V \left(\rho_{fluid} \cdot c_{pfluid} \cdot \frac{\partial T_{fluid}(x, y, z, t)}{\partial t} \right) dV \quad (2.26)$$

Οπότε από τη σχέση (2.23) προκύπτει:

$$\begin{aligned} & \int_V \left(\rho_{fluid} \cdot c_{p_{fluid}} \cdot \frac{\partial T_{fluid}(x, y, z, t)}{\partial t} \right) dV \\ &= \int_S h \cdot [T_{solid}(x, y, z, t) - T_{fluid}(x, y, z, t)] dS - Q_{out} \end{aligned} \quad (2.27)$$

Με τη χρήση της ανωτέρω σχέσης είναι δυνατός ο πλήρης καθορισμός της μεταβολής και της μετάδοσης θερμότητας μέσω του μηχανισμού της συναγωγής ανάμεσα στα δύο συστήματα που θεωρήθηκαν στην αρχή του τρισδιάστατου προβλήματος. Σημειώνεται και πάλι πως οι θερμοκρασίες που περιλαμβάνονται στους τύπους αφορούν τα δύο υλικά, ρευστό και στερεό, και είναι θερμοκρασίες κοντά στην επιφάνεια, όπου παρατηρείται το φαινόμενο της μετάδοσης της θερμότητας.

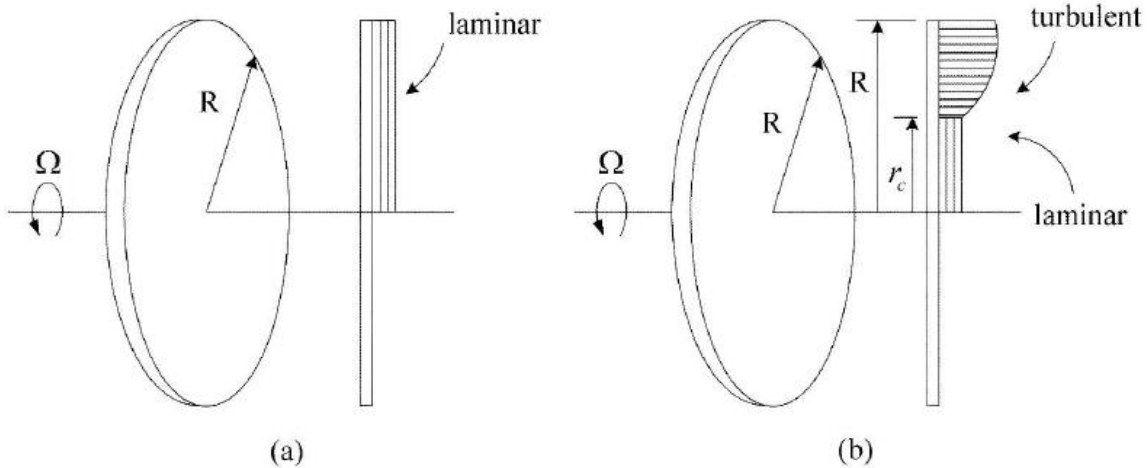
Με την παραδοχή της συμμετρίας στο πρόβλημα, οι ανωτέρω σχέσεις για τη μετάδοση της θερμότητας απλοποιούνται. Σε αυτήν την περίπτωση, οι επιφανειακές θερμοκρασίες των δύο υλικών είναι ανεξάρτητες του χώρου και κατά συνέπεια δεν εξαρτώνται από τη θέση τους στον τρισδιάστατο χώρο. Επιπροσθέτως, αν θεωρήσουμε τον όγκο του στερεού V_{solid} αρκετά μικρό και το στερεό καλό αγωγό της θερμότητας, τότε και η θερμοκρασία του στερεού σταματά να εξαρτάται από τον χώρο. Συνοψίζοντας, οι θερμοκρασίες είναι συναρτήσεις μόνο του χρόνου και όχι των συντεταγμένων x, y, z . Επομένως, η αρχή διατήρησης της ενέργειας για το στερεό με βάση τις παραπάνω παραδοχές μας δίνει:

$$\begin{aligned} & \int_V \left(\rho_{solid} \cdot c_{p_{solid}} \cdot \frac{\partial T_{solid}(x, y, z, t)}{\partial t} \right) dV = \int_V q dV - \int_S h \cdot [T_{solid}(t) - T_{fluid}(t)] dS \Leftrightarrow \\ & \rho_{solid} \cdot c_{p_{solid}} \cdot \frac{\partial T_{solid}(x, y, z, t)}{\partial t} \cdot V_{solid} = Q_g - h \cdot [T_{solid}(t) - T_{fluid}(t)] \cdot S \end{aligned} \quad (2.28)$$

Μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής σε δισκοειδή συστήματα

Το περιστρεφόμενο δισκοειδές σύστημα παίζει σημαντικό ρόλο στην ψύξη και στον αερισμό μιας γεννήτριας αξονικής ροής μονίμων μαγνητών. Ο ακριβής προσδιορισμός των συντελεστών μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής απαιτεί αναλυτική θεωρητική και πειραματική έρευνα λόγω της πολυπλοκότητας της ροής.

Σε αυτήν την υποενότητα θα εξεταστούν οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής για διάφορα μέρη μιας μηχανής αξονικής ροής μονίμων μαγνητών, χρησιμοποιώντας μια σειρά υπάρχοντων μοντέλων:



Σχήμα 2.6: Ελεύθερα περιστρεφόμενος δίσκος (a) σε ελασματώδη ροή, (b) μετάβαση από ελασματώδη σε ταραχώδη ροή

Ελεύθερα περιστρεφόμενος δίσκος

Ο μέσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στην εξωτερική επιφάνεια ενός περιστρεφόμενου δίσκου μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τη σχέση (που αναπτύχθηκε για ελεύθερα περιστρεφόμενο δίσκο [7]):

$$\bar{h} = \frac{k}{R} \overline{Nu} \quad (2.29)$$

όπου R είναι η ακτίνα του δίσκου και ο μέσος αριθμός Nusselt \overline{Nu} δίνεται αναλόγως τις διαφορετικές συνθήκες ροής ως εξής:

- i. Για συνδυασμό ελεύθερης συναγωγής και περιστροφής σε ελασματώδη ροή (Σχήμα 2.6a):

$$\overline{Nu} = \frac{2}{5} (Re^2 + Gr_r)^{\frac{1}{4}} \quad (2.30)$$

$$Gr_r = \frac{\beta g R^3 \pi^2 \Delta T}{\nu^2} \quad (2.31)$$

όπου Re είναι ο αριθμός Reynolds, β ο συντελεστής θερμικής επέκτασης, ν το κινηματικό ιξώδες του υγρού και ΔT η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της επιφάνειας του δίσκου και του περιβάλλοντος αέρα.

- ii. Για συνδυασμό ελασματώδους και ταραχώδους ροής με μετάβαση σε ακτίνα r_c (Σχήμα 2.6b):

$$\overline{Nu} = 0.015 Re^{\frac{4}{5}} - 100 \left(\frac{r_c}{R} \right)^2 \quad (2.32)$$

όπου

$$r_c = (2.5 \times 10^5 \nu / \Omega)^{\frac{1}{2}} \quad (2.33)$$

Η γωνιακή ταχύτητα είναι $\Omega = 2\pi n$, όπου n η περιστροφική ταχύτητα σε στροφές ανά δευτερόλεπτο.

Ακτινική περιφέρεια του δίσκου

Οι σχέσεις για τη μεταφορά θερμότητας για την ακτινική περιφέρεια του δίσκου του δρομέα είναι παρόμοιες με αυτές ενός περιστρεφόμενου κυλίνδρου στον αέρα. Σε αυτήν την περίπτωση ο μέσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας δίνεται ως εξής:

$$\bar{h}_p = \frac{k}{D_{out}} \bar{Nu} \quad (2.34)$$

όπου D_{out} είναι η εξωτερική διάμετρος του δίσκου του δρομέα και ο μέσος αριθμός Nusselt δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{Nu} = 0.133 Re_D^{2/3} Pr^{1/3} \quad (2.35)$$

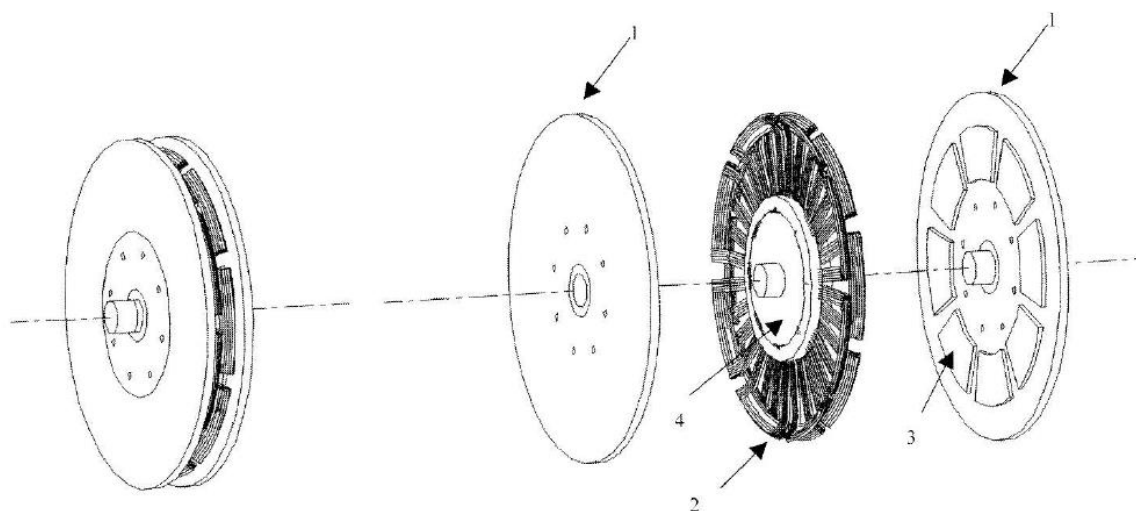
και ο αριθμός Reynolds στην περιφέρεια του δίσκου είναι:

$$Re_D = \Omega \frac{D_{out}^2}{\nu} \quad (2.36)$$

Σημειώνεται πως υποθέτουμε ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας μέσα στον κύλινδρο όταν χρησιμοποιείται η εξίσωση (2.34). Από τη στιγμή που το \bar{h}_p είναι ανάλογο της γωνιακής ταχύτητας Ω , συμπεραίνεται πως, όσο αυξάνεται η γωνιακή ταχύτητα, η περιφέρεια του δρομέα παίζει όλο και σημαντικότερο ρόλο στην απαγωγή της θερμότητας.

Σύστημα δρομέα-στάτη

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.7 μια μηχανή αξονικής ροής μονίμων μαγνητών αποτελείται από περιστρεφόμενους και στατικούς δίσκους. Οι σχέσεις της μεταφοράς θερμότητας μεταξύ ενός περιστρεφόμενου και ενός στατικού δίσκου είναι υψίστης σημασίας για τους θερμικούς υπολογισμούς. Εξαιτίας των φυγόκεντρων δυνάμεων, υπάρχει μια εξαναγκασμένη ροή μεταξύ των δύο δίσκων, που αυξάνει την τοπική μεταφορά θερμότητας σε σύγκριση με αυτήν ενός ελεύθερου δίσκου. Η σχετική αύξηση εξαρτάται από το ρυθμό ροής μάζας, την περιστροφική ταχύτητα του συστήματος και το λόγο διακένου $G = \frac{g}{R}$, όπου g είναι η απόσταση μεταξύ δρομέα και στάτη και R είναι η ακτίνα του δίσκου.



Σχήμα 2.7: Αναλυτική άποψη γεννήτριας αξονικής ροής μονίμων μαγνητών (1: δίσκος δρομέα, 2: τύλιγμα στάτη, 3: μόνιμοι μαγνήτες, 4: πυρήνας)

Στη βιβλιογραφία [8] δίνεται μια προσεγγιστική λύση για τη ροή μεταξύ ενός περιστρεφόμενου και ενός στατικού δίσκου, που συσχετίζει το μέσο αριθμό Nusselt με το στιγμιαίο συντελεστή της επιφάνειας του δρομέα που βρίσκεται από την πλευρά του στάτη, C_{mo} , μέσω της εξίσωσης:

$$\overline{Nu} = Re_r \frac{C_{mo}}{\pi} \quad (2.37)$$

$$C_{mo} Re_r^{1/5} = 0.333 \lambda_T \quad (2.38)$$

όπου λ_T είναι η παράμετρος αναταραχών, δοσμένη ως συνάρτηση του ογκομετρικού ρυθμού ροής Q ως εξής:

$$\lambda_T = \frac{Q}{\nu R} Re_r^{-4/5} \quad (2.39)$$

Αντικαθιστώντας το λ_T προκύπτει ο μέσος αριθμός Nusselt:

$$\overline{Nu} = 0.333 \frac{Q}{\pi \nu R} \quad (2.40)$$

Όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφία [9], έχει αποδειχθεί ότι για μικρό λόγο διακένου ($G < 0.1$), η ροή στο διάκενο αέρος μεταξύ δρομέα και στάτη μπορεί να θεωρηθεί ως συνοριακή επιφάνεια. Παρόλο που δεν είναι απολύτως ακριβής η θεώρηση ότι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής από το στάτη στον αέρα είναι κοντά στον αντίστοιχο από τον αέρα στο δρομέα, μπορεί να θεωρηθούν ίσοι στην προσομοίωση του θερμικού κυκλώματος.

2.3.3 Ακτινοβολία

Η ακτινοβολία είναι ο μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας από ένα σώμα σε ένα άλλο μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, σύμφωνα με την κλασική ηλεκτρομαγνητική θεωρία, ή από φωτόνια, σύμφωνα με την κβαντομηχανική. Η θερμική ακτινοβολία είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που παράγεται από τη θερμική κίνηση των φορτισμένων σωματιδίων στην ύλη. Όλη η ύλη με θερμοκρασία μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν εκπέμπει θερμική ακτινοβολία μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Ο μηχανισμός αυτός αντιπροσωπεύει τη μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρομαγνητική. Η θερμική ενέργεια είναι ουσιαστικά η κινητική ενέργεια των ατόμων και μορίων στην ύλη. Όλη η ύλη που έχει μια θερμοκρασία άνω των μηδέν βαθμών Kelvin εξ ορισμού αποτελείται από σωματίδια που έχουν κινητική ενέργεια και τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Αυτά τα άτομα και τα μόρια αποτελούνται από φορτισμένα σωματίδια, πρωτόνια και ηλεκτρόνια, και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων της ύλης έχουν ως αποτέλεσμα την επιτάχυνση των φορτίων αυτών και της διπολικής ταλάντωσής τους. Αυτό με τη σειρά του οδηγεί στην ηλεκτροδυναμική παραγωγή των ηλεκτροδυναμικά συζευγμένων ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων. Με αυτόν τον τρόπο, έχουμε την εκπομπή φωτονίων, γεγονός που εκπέμπει ενέργεια μέσω ακτινοβολίας μακριά από το σώμα. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, όπως το φως, σε αντίθεση με την αγωγή και τη συναγωγή, δεν απαιτεί την παρουσία ύλης για να διαδοθεί και ταξιδεύει στο κενό του διαστήματος απείρως μακριά, αν δεν παρεμποδιστεί από κάποιο σώμα ή συγκέντρωση μάζας.

Τα χαρακτηριστικά της θερμικής ακτινοβολίας εξαρτώνται από πολλαπλούς παράγοντες, όπως οι διάφορες ιδιότητες της επιφάνειας από την οποία προέρχονται, η θερμοκρασία του σώματος, η φασματική απορροφητικότητα και η φασματική εκπομπή ισχύος, όπως εκφράζονται από το νόμο του Kirchhoff. Η ένταση της ροής ενέργειας που εκπέμπεται εξαρτάται από τη θερμοκρασία του σώματος και τη φύση της επιφάνειας του.

Η μέση ανταλλαγή ακτινοβολίας μεταξύ δύο επιφανειών με διαφορά θερμοκρασίας είναι συνάρτηση της απόλυτης θερμοκρασίας, του συντελεστή εκπομπής και της γεωμετρίας της κάθε επιφάνειας. Αν η θερμότητα μεταφέρεται μέσω ακτινοβολίας μεταξύ δύο επιφανειών πεπερασμένου μεγέθους, A_1 και A_2 , και θερμοκρασίας, T_1 και T_2 (σε βαθμούς Κελσίου), ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας, ΔP_r , γράφεται ως εξής:

$$\Delta P_r = \sigma \frac{(T_1+273)^4 - (T_2+273)^4}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}} \quad (2.41)$$

όπου σ είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann, F_{12} ένας παράγοντας που λαμβάνει υπόψη του τη σχετική κατεύθυνση των δύο επιφανειών και ε_1 και ε_2 οι αντίστοιχοι συντελεστές εκπομπής, οι οποίοι εξαρτώνται από την επιφάνεια. Μερικές χαρακτηριστικές τιμές συντελεστών εκπομπής υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή μηχανών αξονικής ροής μονίμων μαγνητών παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3 [4]:

Material	Surface condition	Emissivity, ε
Copper	Polished	0.025
Epoxy	Black	0.87
	White	0.85
Mild steel	-	0.2-0.3
Cast iron	Oxidized	0.57
Stainless steel	-	0.2-0.7
Permanent magnet, NdFeB	Uncoated	0.9

Πίνακας 2.3: Επιλεγμένοι συντελεστές εκπομπής σχετικοί με μηχανές αξονικής ροής μονίμων μαγνητών

2.4 Θερμοκρασιακοί περιορισμοί στις ηλεκτρικές μηχανές

Οι θερμοκρασίες τήξης των υλικών και η αντοχή των μονώσεων ορίζουν τους περιορισμούς λειτουργίας των ηλεκτρικών μηχανών από άποψη θερμοκρασίας.

Το σημείο τήξης του χαλκού, από τον οποίο κατά βάση κατασκευάζονται τα τυλίγματα των πηνίων σε μια ηλεκτρική μηχανή, είναι στους 1084.6 °C. Η αντοχή μόνωσης του πυρήνα και του στάτη που είναι κατασκευασμένοι από σίδηρο είναι 1535 °C. Ο κρισιμότερος περιορισμός για τη λειτουργία της μηχανής είναι η μόνωση του χαλκού. Στις περισσότερες μηχανές η μόνωση αυτή αποτελείται από βερνίκι, πολυεστέρα, πολυουρεθάνη, ή πολυβινύλιο. Σύμφωνα με τη Διεθνή Επιτροπή Ηλεκτροτεχνίας, η μόνωση έχει ταξινομηθεί σε κλάσεις ανάλογα με τη θερμοκρασία αντοχής. Οι κλάσεις αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.4:

Κλάση μόνωσης	Μέγιστη αύξηση θερμοκρασίας	Μέση θερμοκρασία μόνωσης	Οριακή θερμοκρασία θερμότερου σημείου
A	60	90	100
E	70	115	120
B	80	120	130
F	100	140	155
H	125	165	180

Πίνακας 2.4: Κλάσεις μόνωσης σύμφωνα με τη Διεθνή Επιτροπή Ηλεκτροτεχνίας

Αφού η κλάση της μόνωσης αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό της μηχανής και το κόστος για την επανατοποθέτηση του βερνικιού είναι ιδιαίτερα υψηλό, οι κατασκευαστές επιλέγουν την τοποθέτηση μόνωσης κλάσης τύπου H, η οποία διαθέτει τη μεγαλύτερη οριακή θερμοκρασία θερμότερου σημείου, επομένως θεωρείται η ανθεκτικότερη δυνατή μόνωση.

Κατ' αυτόν τον τρόπο, επιτρέπεται η λειτουργία της μηχανής σε υψηλότερες θερμοκρασίες, ενώ παράλληλα έχει και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, εφόσον βέβαια δε λειτουργεί σε υψηλότερες από το επιτρεπτό θερμοκρασίες για μεγάλο χρονικό διάστημα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία στο εσωτερικό της μηχανής και οι μονώσεις καταπονούνται, τόσο μειώνεται η διάρκεια ζωής της μόνωσης και κατ' επέκταση της ηλεκτρικής μηχανής. Η μερική ή ολική καταστροφή της μόνωσης είναι ζωτικής σημασίας, καθώς σε αυτήν την περίπτωση χάνει τη διηλεκτρική της ικανότητα και έχουμε διαρροή ρεύματος.

2.5 Θερμική αντίσταση

Η θερμική ανάλυση μια ηλεκτρικής μηχανής απαιτεί να γνωρίζουμε τη θερμική αντίσταση κάθε μέρους της. Όπως περιγράφηκε προηγουμένως, η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα σε δύο μέρη της μηχανής δημιουργεί ροή θερμότητας και η θερμική αντίσταση θα εξαρτάται από τη ροή αυτή. Η θερμική αντίσταση για κάθε μηχανισμό μεταφοράς της θερμοκρασίας υπολογίζεται διαφορετικά:

- Για το μηχανισμό της αγωγής η θερμική αντίσταση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R_{thermal,cond} = \frac{T_1 - T_2}{\bar{q}} = \frac{l}{A_d k} \quad (2.42)$$

όπου k η θερμική αγωγιμότητα του υλικού, l το μήκος και A_d η διατομή της διαδρομής της ροής θερμότητας.

- Για το μηχανισμό της συναγωγής ο υπολογισμός της θερμικής αντίστασης γίνεται μέσω του τύπου:

$$R_{therm,conv} = \frac{T_{solid} - T_{env}}{\bar{q}} = \frac{1}{A_c h} \quad (2.43)$$

όπου h είναι ο συντελεστής συναγωγής και A_c είναι η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής μεταξύ δύο περιοχών.

- Για το μηχανισμό της ακτινοβολίας προκύπτει ως εξής:

$$R_{therm,rad} = \frac{T_1 - T_2}{\bar{q}} = \frac{1}{A_d \cdot a_r} \quad (2.44)$$

όπου $a_r = \varepsilon \cdot \sigma \frac{T_1^4 - T_2^4}{T_1 - T_2}$ ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας για το μηχανισμό της ακτινοβολίας.

2.6 Ψύξη στις ηλεκτρικές μηχανές

Για την αποφυγή των προβλημάτων υπερθέρμανσης μιας ηλεκτρικής μηχανής και την πιθανότητα επακόλουθης βλάβης, είναι επιθυμητή η ψύξη της μηχανής με διάφορες τεχνικές. Αναλόγως το μέγεθος και την ονομαστική ισχύ της μηχανής, χρησιμοποιούνται διαφορετικές διατάξεις στην ψύξη τους. Γενικότερα, όσο περισσότερο αυξάνονται αυτά τα δύο μεγέθη τόσο δυσκολότερη γίνεται η απαγωγή της θερμότητας. Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι ψύξης των σύγχρονων ηλεκτρικών μηχανών είναι οι εξής [13]:

- Φυσική ψύξη: Σε μηχανές χαμηλής ισχύος χρησιμοποιείται ο περιβάλλον αέρας και η φυσική ροή του μέσω του μηχανισμού της συναγωγής για την ψύξη της μηχανής.
- Ψύξη με εξαναγκασμένη ροή αέρα: Στο εσωτερικό της μηχανής τοποθετείται ένα περίπλοκο σύστημα αγωγών, περσίδων και ανεμιστήρων για την ψύξη της μηχανής. Στην περίπτωση των μηχανών ανοιχτού τύπου, η ροή αέρα διευκολύνεται με την τοποθέτηση περσίδων στο κέλυφος της μηχανής. Ο αέρας διοχετεύεται με ανεμιστήρες τοποθετημένους στον άξονα του δρομέα ή με φυσητήρα που κινείται ξεχωριστά σχεδόν σε όλα τα διαθέσιμα μέρη και μετά στο περιβάλλον μέσω των περσίδων. Στην περίπτωση των μηχανών έγκλειστου τύπου, υπάρχει ένα ειδικά διαμορφωμένο κέλυφος, έτσι ώστε ο αέρας να οδηγείται στο περιβάλλον, καθώς και ανεμιστήρες για την οδήγηση του αέρα.
- Σύστημα υδρόψυξης, για μηχανές ισχύος 1MW έως 100MW: Η ροή αέρα που απαιτείται στις μηχανές αυτές είναι πολύ μεγάλη και προκαλεί φαινόμενα στροβιλισμού και σπηλαίωσης, τα οποία επηρεάζουν αρνητικά τη σωστή λειτουργία της μηχανής.
- Ψύξη με υγρό υδρογόνο, για μηχανές ισχύος μεγαλύτερης των 100MW: Η μικρή πυκνότητα και η μεγάλη ειδική θερμοχωρητικότητα του υδρογόνου σε σχέση με τον αέρα το καθιστούν ιδανικό για την ψύξη μηχανών μεγάλης ισχύος, καθώς μειώνονται σε μεγάλο βαθμό οι καταπονήσεις των μονώσεων, αυξάνοντας κατά συνέπεια τη διάρκεια ζωής της μηχανής σε σημαντικό βαθμό. Η στεγανοποίηση της μηχανής είναι απαραίτητη για την χρήση αυτού του συστήματος, ενώ αξίζει να σημειωθεί πως η πιθανότητα ανάφλεξης είναι πολύ μικρή.

Ειδικά για τις μηχανές αξονικής ροής μονίμων μαγνητών, γίνεται χρήση κυρίως των δύο πρώτων μεθόδων και έτσι προκύπτουν οι εξής δύο κατηγορίες, με κριτήριο την ψύξη τους:

- Μηχανές με φυσικό αερισμό, στις οποίες αέρας για την ψύξη τους παράγεται από το δρομέα που περιστρέφεται, τα κανάλια που σχηματίζουν οι μόνιμοι μαγνήτες ή άλλες συσκευές, η λειτουργία των οποίων προσομοιάζει αυτήν ενός ανεμιστήρα και που είναι ενσωματωμένες στο περιστρεφόμενο τμήμα της μηχανής. Το πλεονέκτημα των

μηχανών αξονικής ροής σε σύγκριση με τις υπόλοιπες συμβατικές ηλεκτρικές μηχανές είναι η δυνατότητα αυτό-αερισμού που διαθέτουν. Παρατηρώντας τη δομή μιας τέτοιας διάταξης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7, εύκολα βλέπει κανείς πως ένα ρεύμα αέρα θα εισέλθει από τις οπές εισόδου και στη συνέχεια θα αναγκαστεί να εξέλθει από τα κανάλια που σχηματίζουν οι μόνιμοι μαγνήτες, οι οποίοι λειτουργούν ως ανεμιστήρας όταν περιστρέφεται ο δρομέας.

- Μηχανές με εξωτερικό αερισμό, στις οποίες το ψυκτικό μέσο κυκλοφορεί με τη βοήθεια εξωτερικών συσκευών, όπως παραδείγματος χάρη ενός ανεμιστήρα ή μιας αντλίας. Για μηχανές μεσαίας ή υψηλής ισχύος, οι απώλειες λόγω της θερμότητας αυξάνονται γραμμικά με την ισχύ, οπότε είναι απαραίτητη η εξαναγκασμένη ψύξη με τη βοήθεια εξωτερικών συσκευών.

Κεφάλαιο 3: Θερμικό μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων

Κυκλώματα συγκεντρωμένων παραμέτρων, αποτελούμενα από ένα δίκτυο θερμικών αντιστάσεων, θερμικών χωρητικότητων, σημειακών θερμοκρασιών και πηγών θερμότητας, έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς για να αναπαραστήσουν τις πολύπλοκες διανεμημένες θερμικές παραμέτρους των ηλεκτρικών μηχανών. [6,10,11]

Γενικά, το μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων είναι ένας τρόπος απλοποίησης της συμπεριφοράς χωρικά κατανεμημένων συστημάτων ως μια τοπολογία που αποτελείται από διακριτές ποσότητες και η οποία προσεγγίζει τη συμπεριφορά των κατανεμημένων συστημάτων υπό κάποιες συνθήκες. Η θερμική ανάλυση με τη συγκεκριμένη μέθοδο μας δίνει αποτελέσματα για τη θερμική συμπεριφορά της μηχανής, τόσο στη μόνιμη κατάσταση όσο και στη μεταβατική.

Το θερμικό ισοδύναμο μοντέλο που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα προσομοίωσης αντιστοιχίζει θερμικά με ηλεκτρικά μεγέθη, των οποίων οι τιμές προσδιορίζονται από τύπους και πειραματικές μετρήσεις. Η ηλεκτρική μηχανή θα αναλυθεί ουσιαστικά σε ένα σύνολο συγκεντρωμένων στοιχείων, το καθένα από τα οποία περιλαμβάνει μια πηγή θερμότητας, η οποία θεωρείται συγκεντρωμένη σε ένα σημείο για κάθε στοιχείο, και συνδέεται με τα γειτονικά στοιχεία μέσω θερμικών αντιστάσεων και χωρητικότητων. Το θερμικό μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων εξάγει αποτελέσματα λαμβάνοντας υπόψιν όλους τους μηχανισμούς μετάδοσης της θερμότητας, τα οποία θα συγκριθούν με τα πειραματικά για να ελεγχθεί η ορθότητα και η αξιοπιστία της μεθόδου. Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία θα ληφθούν υπόψη μόνο οι θερμικές αντιστάσεις και θα αγνοηθούν οι χωρητικότητες, καθώς σκοπός της ανάλυσης εν προκειμένω είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων για τη θερμική συμπεριφορά σε πρώτη φάση μόνο στη μόνιμη κατάσταση.

3.1 Θερμικό ισοδύναμο κύκλωμα

Ένα θερμικό ισοδύναμο κύκλωμα είναι ουσιαστικά το ανάλογο ενός ηλεκτρικού κυκλώματος, στο οποίο η θερμότητα (κυκλωματικό ανάλογο του ρεύματος) που ρέει σε κάθε διαδρομή του κυκλώματος δίνεται από μια θερμοκρασιακή διαφορά (κυκλωματικό ανάλογο της τάσης) διαιρούμενη με μια θερμική αντίσταση (κυκλωματικό ανάλογο της ηλεκτρικής αντίστασης). Ουσιαστικά, όπως και σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, ροή θερμότητας (ροή ρεύματος) έχουμε λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας (διαφοράς δυναμικού) μεταξύ δύο σημείων και η θερμική αντίσταση (ηλεκτρική αντίσταση) περιγράφει τη δυσκολία που συναντά η θερμότητα κατά τη διάδοσή της στις διαδρομές μεταξύ των στοιχείων.

Για την αγωγή, η θερμική αντίσταση εκφράζεται ως εξής:

$$R_d = \frac{l}{A_d k} \quad (3.1)$$

όπου k είναι η θερμική αγωγιμότητα του υλικού, l και A_d το μήκος και η διατομή της διαδρομής της ροής θερμότητας αντίστοιχα.

Για τη συναγωγή η θερμική αντίσταση ορίζεται ως εξής:

$$R_c = \frac{1}{A_c h} \quad (3.2)$$

όπου A_c είναι η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής μεταξύ δύο περιοχών και h είναι ο συντελεστής συναγωγής.

Για την ακτινοβολία μεταξύ δύο περιοχών η θερμική αντίσταση είναι:

$$R_r = \frac{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}}{\sigma[(T_1+273)+(T_2+273)][(T_1+273)^2+(T_2+273)^2]} \quad (3.3)$$

Παρατηρείται πως η θερμική αντίσταση ακτινοβολίας (3.3) εξαρτάται από τη διαφορά της τρίτης δύναμης της θερμοκρασίας, του συντελεστή εκπομπής ε και τον προσανατολισμό των επιφανειών που λαμβάνεται υπόψη μέσω του συντελεστή F . Στην παρούσα διπλωματική εργασία δεν θα ληφθεί υπόψη η θερμική αντίσταση στην περίπτωση της ακτινοβολίας, διότι σε σύγκριση με τις αντίστοιχες θερμικές αντιστάσεις της αγωγής και της συναγωγής είναι πολύ μικρή και θεωρείται σχεδόν αμελητέα.

Το θερμικό κύκλωμα στη μόνιμη κατάσταση αποτελείται από θερμικές αντιστάσεις και πηγές θερμότητας συνδεδεμένες μεταξύ τους μέσω κόμβων. Για τη μεταβατική ανάλυση, οι θερμικές χωρητικότητες χρησιμοποιούνται επιπλέον για να ληφθεί υπόψη η αλλαγή της εσωτερικής ενέργειας σε διάφορα μέρη της μηχανής με την πάροδο του χρόνου. Η θερμοχωρητικότητα ορίζεται ως εξής:

$$C = \rho V c_p = m c_p \quad (3.4)$$

όπου c_p είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού, ρ η πυκνότητα και V και m είναι ο όγκος και η μάζα του υλικού αντίστοιχα.

Ο νόμος του Ohm για τη μεταφορά θερμότητας δίνει την εξής σχέση για τη ροή θερμότητας σε ένα θερμικό δίκτυο:

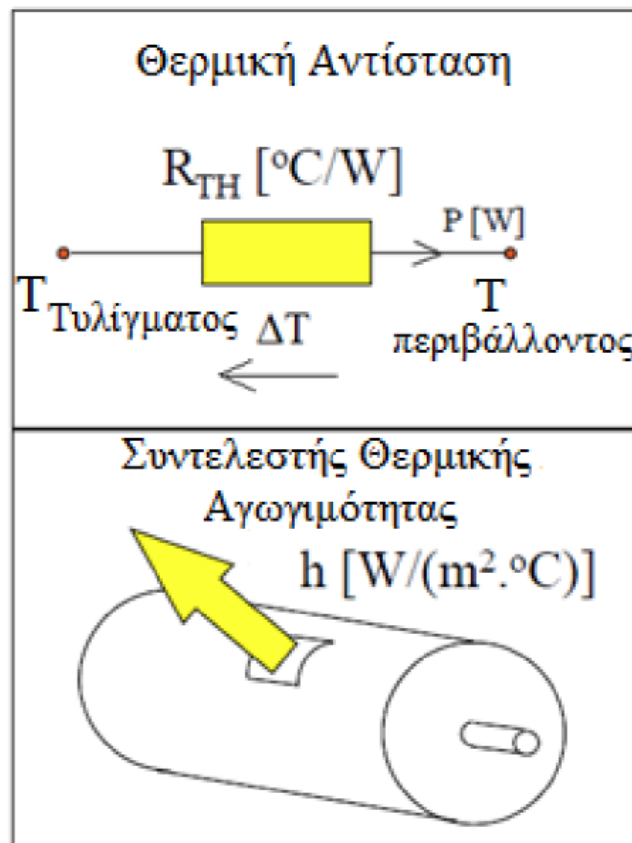
$$P = \frac{\Delta T}{R} \quad (3.5)$$

όπου P η ισχύς μετρημένη σε W , ΔT η διαφορά θερμοκρασίας σε βαθμούς Κελσίου και R η θερμική αντίσταση σε $\frac{C}{W}$.

Σε περίπτωση ανόδου της θερμοκρασίας του ρευστού, τα παραπάνω μεγέθη υπολογίζονται από τη σχέση:

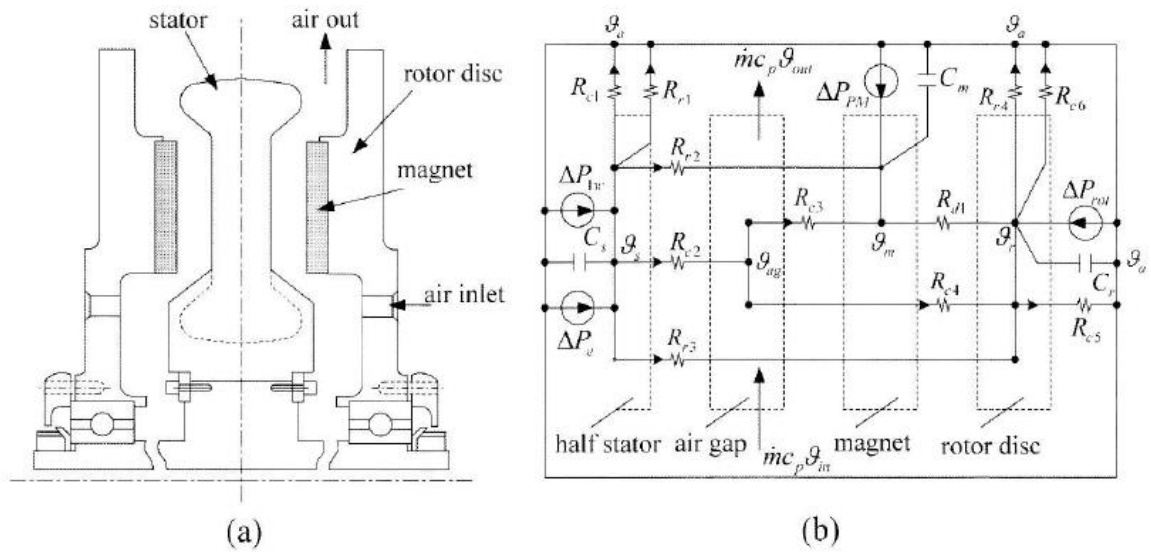
$$\Delta T = \frac{\text{Διαχέομενη ισχύς}}{\text{Ρυθμός ροής όγκου} \cdot \text{Πυκνότητα} \cdot \text{Ειδική θερμοχωρητικότητα}} \quad (3.6)$$

Παρακάτω παρατίθεται το θερμικό ισοδύναμο του νόμου του Ohm:



Σχήμα 3.1: Θερμικό ισοδύναμο νόμου Ohm.

Στο Σχήμα 3.2 φαίνεται μια τμηματική τομή μιας μηχανής αξονικής ροής μονίμων μαγνητών με στάτη χωρίς πυρήνα. Παρατηρείται πως ο στάτης της μηχανής αυτής είναι συμμετρικός από πλευράς μεταφοράς θερμότητας και το ένα μισό της μηχανής από την κεντρική διαχωριστική γραμμή αντικατοπτρίζει το άλλο μισό. Επομένως, είναι λογικό να μοντελοποιηθεί μόνο το μισό της μηχανής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2b:



Σχήμα 3.2: Κύκλωμα θερμικών αντιστάσεων μιας μηχανής αξονικής ροής μόνιμων μαγνητών με στάτη χωρίς πυρήνα.

Οι πηγές θερμότητας ΔP_{1w} , ΔP_e , ΔP_{PM} και ΔP_{rot} απεικονίζουν τις απώλειες στα τυλίγματα, τις απώλειες δινορρευσμάτων στο μισό του τυλίγματος του στάτη, τις απώλειες στους μόνιμους μαγνήτες και τις απώλειες περιστροφής στον ένα δίσκο του δρομέα αντίστοιχα. C_s , C_m και C_r είναι οι θερμοχωρητικότητες του στάτη, των μόνιμων μαγνητών και του δρομέα αντίστοιχα. Οι θερμικές αντιστάσεις του κυκλώματος περιγράφονται στον ακόλουθο πίνακα:

Σύμβολα	Ορισμός
R_{c1}	Αντίσταση συναγωγής από το ακρο-τύλιγμα του στάτη στον περιβάλλοντα αέρα
R_{c2}	Αντίσταση συναγωγής από το στάτη στο διάκενο αέρος
R_{c3}	Αντίσταση συναγωγής από το διάκενο αέρος στους μόνιμους μαγνήτες
R_{c4}	Αντίσταση συναγωγής από το διάκενο αέρος στο δίσκο του δρομέα
R_{c5}	Αντίσταση συναγωγής από το δίσκο του δρομέα στον περιβάλλοντα αέρα
R_{c6}	Αντίσταση συναγωγής από την ακτινική περιφέρεια του δρομέα στον περιβάλλοντα αέρα
R_{r1}	Αντίσταση ακτινοβολίας από το ακρο-τύλιγμα του στάτη στο περιβάλλον
R_{r2}	Αντίσταση ακτινοβολίας από το στάτη στους μόνιμους μαγνήτες
R_{r3}	Αντίσταση ακτινοβολίας από το στάτη στο δίσκο του δρομέα
R_{r4}	Αντίσταση ακτινοβολίας από την ακτινική περιφέρεια του δρομέα στο περιβάλλον
R_{d1}	Αντίσταση αγωγής από τους μόνιμους μαγνήτες στο δίσκο του δρομέα

Πίνακας 3.1: Θερμικές αντιστάσεις ισοδύναμου θερμικού κυκλώματος.

3.2 Διατήρηση της ενέργειας

Στην περίπτωση που εφαρμόζεται η αρχή διατήρησης της ενέργειας, ο ρυθμός αλλαγής της εσωτερικής ενέργειας σε κάθε τμήμα μιας μηχανής περιγράφεται ως εξής:

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} = C \frac{\Delta T}{\Delta t} = \Delta P_{in} - \Delta P_{out} + \dot{m}_{in} i_{in} - \dot{m}_{out} i_{out} \quad (3.7)$$

όπου U είναι η εσωτερική ενέργεια, \dot{m} ο ρυθμός ροής μάζας, i η ενθαλπία και C η θερμοχωρητικότητα του υπό έλεγχο όγκου.

Στη μόνιμη κατάσταση, $\frac{\Delta U}{\Delta t} = 0$ και συνεπώς:

$$0 = \Delta P_{in} - \Delta P_{out} + \dot{m}_{in} i_{in} - \dot{m}_{out} i_{out} \quad (3.8)$$

Οι εξισώσεις αυτές εφαρμόζονται για κάθε τμήμα της μηχανής αξονικής ροής μονίμων μαγνητών, δηλαδή το στάτη, το διάκενο, τους μόνιμους μαγνήτες και το δρομέα, ώστε να ληφθεί ένα σύστημα εξισώσεων με μόνες αγνώστους τις θερμοκρασίες του κάθε τμήματος. Το σύστημα αυτό των εξισώσεων είναι ιδιαίτερα πολύπλοκο, αλλά μπορεί να λυθεί με τη χρήση μιας υπολογιστικής μεθόδου, όπως η επαναληπτική μέθοδος Gauss-Seidel. Πρέπει να σημειωθεί πως ο όρος $(\dot{m}_{in} i_{in} - \dot{m}_{out} i_{out})$ στις ανωτέρω εξισώσεις αναπαριστά την εσωτερική θερμότητα που απομακρύνεται μέσω της ροής αέρα που αντλείται μέσα στη μηχανή. Αυτή η ροή αέρα είναι υψίστης σημασίας για την ψύξη της μηχανής. Ο προσδιορισμός της θερμοκρασίας του διακένου στο θερμικό ισοδύναμο κύκλωμα είναι δυνατός μόνο εάν ο ρυθμός ροής μάζας μέσω του διακένου μπορεί με κάποιο τρόπο να υπολογιστεί.

3.3 Πειραματικός υπολογισμός του ονομαστικού ρυθμού ροής αέρα

Με βάση τη βιβλιογραφία [4] γνωρίζουμε πως ο υπολογισμός της τιμής του ονομαστικού ρυθμού ροής αέρα είναι πολύπλοκος, λόγω της φύσης και της πολυπλοκότητας της θερμικής ανάλυσης, και η καλύτερη δυνατή προσέγγιση είναι η πειραματική. Για τον υπολογισμό αυτό ακολουθείται μια συγκεκριμένη διαδικασία. Αναλόγως την τοπολογία και το μέγεθος της μηχανής, οι μετρήσεις μπορούν να γίνουν είτε στην είσοδο είτε στην έξοδο της ροής του αέρα, όπου τοποθετείται ένας αγωγός εκκένωσης, προκειμένου να επιτευχθούν ιδανικές συνθήκες για την παρατήρηση της ροής. Η υπό εξέταση γεννήτρια αξονικής ροής μονίμων μαγνητών οδηγείται συνήθως από κάποιον κινητήρα. Στο σημείο όπου θα γίνει η μέτρηση τοποθετείται ένα ανεμόμετρο προκειμένου να μετρηθεί η ταχύτητα του ανέμου.

Προκειμένου να μεταβάλλεται ο ρυθμός ροής, στην έξοδο της ροής του αέρα τοποθετείται ένα εμπόδιο. Στο σημείο αυτό μετρείται και η πίεση με τη χρήση ενός μανομέτρου. Το πείραμα εκτελείται αρχικά χωρίς εμπόδιο στο τέλος του αγωγού εκκένωσης. Έτσι, η μόνη αντίσταση στη ροή του αέρα είναι η τριβή, η οποία είναι μικρή και μπορεί εύκολα να

αφαιρεθεί από τα αποτελέσματα. Όσο διεξάγεται το πείραμα, σταδιακά αυξάνεται η αντίσταση στη ροή του αέρα, μεταβάλλοντας τη θέση του εμποδίου, με συνέπεια να μειώνεται η ροή του αέρα και να αυξάνεται η πίεση, ώσπου να φτάσει τη μέγιστη τιμή της για μηδενικό ρυθμό ροής. Η διαφορά πίεσης Δp μετριέται ως συνάρτηση του χωρικού ρυθμού ροής $Q = A \cdot v$ για διάφορες ταχύτητες, όπου v η γραμμική ταχύτητα.

Η μέτρηση του ρυθμού ροής αέρα μετριέται και μέσω της διαφοράς πίεσης Δp στην είσοδο της ροής του αέρα. Κατά αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατός και ο υπολογισμός του ρυθμού ροής μάζας $\dot{m} = \sqrt{2\rho\Delta p}A_d$, όπου A_d είναι το εμβαδό της διατομής του αγωγού εισόδου.

3.4 Θερμική ανάλυση σύγχρονης γεννήτριας AFPM 600 W

Με βάση την παραπάνω θεωρητική ανάλυση θα αναπτυχθεί η θερμική ανάλυση μιας γεννήτριας μονίμων μαγνητών αξονικής ροής 600 W. Μέσω του μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων θα υπολογιστούν οι τιμές της θερμοκρασίας στη μόνιμη κατάσταση σε επιμέρους τμήματα της γεννήτριας που μας ενδιαφέρουν, δηλαδή στο στάτη, το διάκενο και το δρομέα. Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της ηλεκτρικής μηχανής που εξετάζεται:

ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	
Όνομαστικής Ισχύς	600 W
Όνομαστική Συχνότητα	50 Hz
Αριθμός Πόλων	12
Αριθμός Πηνίων	9
ΔΡΟΜΕΑΣ	
Δίσκοι	
Πάχος Δίσκου	8 mm
Εσωτερική Ακτίνα	104 mm
Εξωτερική Ακτίνα	150 mm
Μαγνήτες	
Πάχος Μαγνήτη	10 mm
Πλάτος Μαγνήτη	30 mm
Μήκος Μαγνήτη (Ενεργό Μήκος)	46 mm
ΣΤΑΤΗΣ	
Πηνία	
Αξονικό Πάχος Πηνίου	13 mm
Πάχος Πλευράς	21 mm
Αριθμός Σπειρών	90
Διάμετρος Χαλκού	0.95 mm

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά γεννήτριας 600 W.

Αρχικά, πρέπει να γίνει ο υπολογισμός κάποιων θερμοκρασιακών συντελεστών, σχετικών κυρίως με τη συναγωγή, που χρησιμεύουν για το μετέπειτα υπολογισμό των θερμικών

αντιστάσεων. Για τον υπολογισμό αυτών των συντελεστών απαιτούνται οι παρακάτω σταθερές:

Σταθερά	Τιμή
Δυναμικό ιξώδες του αέρα (μ)	$1.8467 \cdot 10^{-5} Pa \cdot s$
Πυκνότητα του αέρα (ρ)	$1.177 kg/m^3$
Θερμική αγωγιμότητα του αέρα (k)	$0.02624 W/(m \cdot ^\circ C)$

Πίνακας 3.3: Σταθερές του αέρα.

Εν συνεχεία, απαιτούνται οι απώλειες που παρουσιάζει η γεννήτρια κατά τη λειτουργία της, προκειμένου να εξαχθούν οι εξισώσεις βάσει της αρχής διατήρησης της ενέργειας. Οι απώλειες αυτές για ρεύμα λειτουργίας 8.96 A είναι οι εξής:

Είδος απωλειών	Τιμή
Απώλειες χαλκού (ΔP_{Cu})	167.411 W
Απώλειες δινορρευμάτων (ΔP_e)	2.706 W
Απώλειες περιστροφής (ΔP_{rot})	9.138 W

Πίνακας 3.4: Απώλειες γεννήτριας 600 W για ρεύμα 8.96 A.

Για τον υπολογισμό των απωλειών χαλκού απαιτείται η τιμή της αντίστασης φάσης της γεννήτριας αυτής. Η τιμή αυτή είναι γνωστή και έχει προσδιοριστεί πειραματικά ίση με 0.6951Ω στους $70^\circ C$. Επομένως, οι απώλειες χαλκού υπολογίζονται ως εξής:

$$\Delta P_{Cu} = 3 \cdot I^2 R = 3 \cdot 8.96^2 \cdot 0.6951 = 167.411 W$$

Οι τιμές των απωλειών δινορρευμάτων και περιστροφής θεωρούνται δεδομένες.

3.4.1 Συντελεστής συναγωγής της εξωτερικής επιφάνειας του δίσκου του δρομέα

Ο αριθμός του Reynolds είναι:

$$Re = \rho \frac{\Omega D_{out}^2}{4\mu} = 1.177 \cdot \frac{2\pi \frac{500}{60} \cdot 0.3^2}{4 \cdot 1.8467 \cdot 10^{-5}} = 63794.72817$$

και

$$Gr = \frac{\beta g R^3 \pi^{3/2} \Delta T}{\nu^2} = \frac{3.43 \cdot 10^{-3} \cdot 9.81 \cdot 0.15^3 \cdot \pi^{3/2} (T_3 - T_2)}{(1.569 \cdot 10^{-5})^2} = 2568714.436 \cdot (T_3 - T_2)$$

όπου β είναι ο συντελεστής θερμικής διαστολής του αέρα, ν το κινηματικό ιξώδες και ΔT η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της επιφάνειας του δίσκου και του περιβάλλοντα αέρα.

Ο μέσος αριθμός Nusselt δίνεται:

$$\overline{Nu} = \frac{2}{5} (Re^2 + Gr)^{1/4}$$

και ο συντελεστής συναγωγής δίνεται από τον τύπο:

$$\begin{aligned} \bar{h}_{fr} &= \frac{k}{R} \overline{Nu} = \frac{k}{R} \frac{2}{5} (Re^2 + Gr)^{1/4} \\ &= \frac{0.02624}{0.15} \cdot \frac{2}{5} (63794.72817^2 + 2568714.436 \cdot (T_3 - T_2))^{1/4} \\ &= 0.17493 \cdot (63794.72817^2 + 2568714.436 \cdot (T_3 - T_2))^{1/4} \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right) \end{aligned}$$

3.4.2 Συντελεστής συναγωγής της περιφέρειας του δίσκου του δρομέα

Ο αριθμός Prandtl για τους 20 °C θεωρείται 0.713 και ο αριθμός Reynolds για την περιφέρεια του δίσκου δίνεται από τον τύπο:

$$Re_D = \Omega \frac{D_{out}^2}{\nu} = \frac{2\pi \cdot 500}{60} \frac{0.3^2}{1.569 \cdot 10^{-5}} = 300343.4659$$

Επομένως, ο μέσος αριθμός Nusselt προκύπτει:

$$\overline{Nu} = 0.133 Re_D^{2/3} Pr^{1/3} = 0.133 \cdot 300343.4659^{2/3} \cdot 0.713^{1/3} = 532.8769599$$

Τέλος, ο μέσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας είναι:

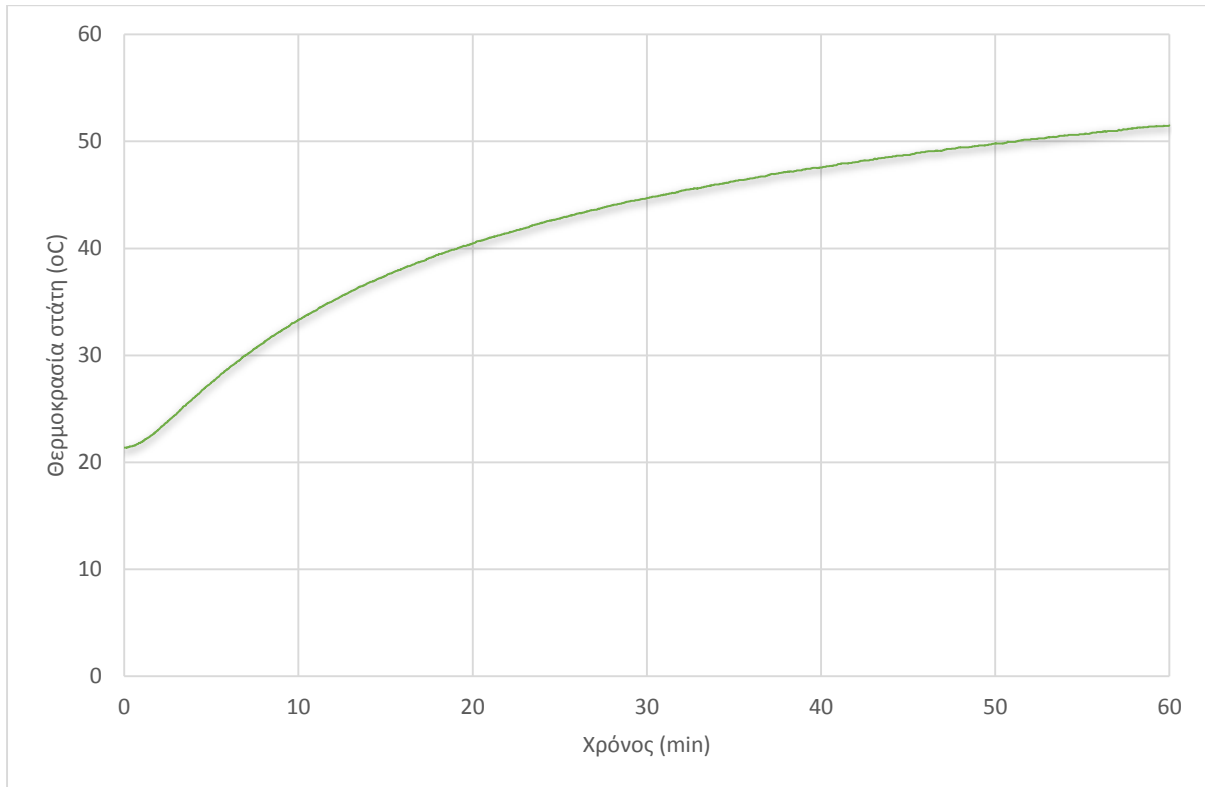
$$\bar{h}_p = \frac{k}{D_{out}} \overline{Nu} = \frac{0.02624}{0.3} \cdot 532.8769599 = 46.609 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

3.4.3 Συντελεστής συναγωγής συστήματος στάτη-δρομέα

Όπως φαίνεται από τη διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως, ο υπολογισμός της τιμής του ονομαστικού ρυθμού ροής αέρα είναι αρκετά περίπλοκος και στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας κρίθηκε σκόπιμο να μην εξεταστεί. Αντιθέτως, ο προσδιορισμός των τιμών του Q για κάθε γεννήτρια γίνεται με τη δοκιμή διαφόρων τιμών στο μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων, μέχρις ότου προσεγγιστούν αρκετά ικανοποιητικά οι πειραματικές μετρήσεις.

Από τη βιβλιογραφία [12] γνωρίζουμε πως ο ρυθμός ροής του αέρα για γεννήτρια AFPM ισχύος 3 kW προσεγγίζεται πειραματικά στο εύρος τιμών 0.001 – 0.0012 m^3/s . Εν προκειμένω, για τη γεννήτρια ισχύος 600 W θα αναζητηθούν τιμές για το Q μικρότερες αυτού του εύρους, καθώς από τη θεωρία προκύπτει πως όσο μειώνεται η ακτίνα μιας γεννήτριας

τόσο μειώνεται και ο ρυθμός ροής του αέρα σε αυτήν. Προκειμένου να εξακριβωθεί η θερμοκρασία της τελικής κατάστασης της γεννήτριας αυτής, εκτελείται ένα πείραμα για ρεύμα λειτουργίας $I = 7.03 A$ για μία ώρα. Οι μετρήσεις αποθηκεύονται μέσω του ψηφιακού παλμογράφου και λαμβάνεται η ακόλουθη γραφική παράσταση:



Σχήμα 3.3: Θερμοκρασία του στάτη συναρτήσει του χρόνου.

Η θερμοκρασία του στάτη δείχνει να σταθεροποιείται στους $51.51\text{ }^{\circ}\text{C}$, καθώς μια άνοδος $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ μέσα σε 20 λεπτά λειτουργίας είναι μια αρκετά καλή προσέγγιση της τελικής κατάστασης. Ρυθμίζοντας την τιμή του Q κατάλληλα, μέσω της δοκιμής διαφόρων τιμών του, καταλήγουμε μέσω του μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων στην τελική θερμοκρασία $49.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, η οποία έχει σφάλμα -3.126% από την πειραματική τιμή, και θεωρείται μια ικανοποιητική προσέγγιση.

Έτσι, έπειτα από αυτή τη διαδικασία ρύθμισης των παραμέτρων με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα, προκύπτει η τιμή του $Q = 0.004\text{ m}^3/\text{s}$.

Συνεχίζοντας την υπολογιστική διαδικασία έχουμε:

Ο μέσος αριθμός Nusselt δίνεται από τον τύπο:

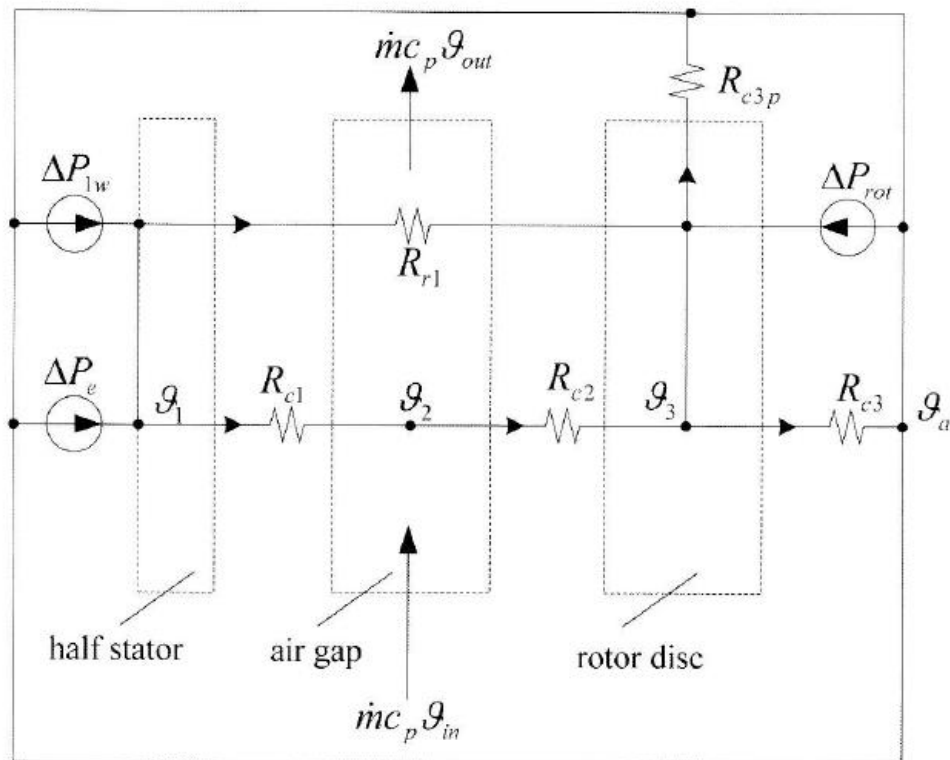
$$\overline{Nu} = 0.333 \frac{Q}{\pi \nu \left(\frac{D_{out}}{2} \right)} = 0.333 \cdot \frac{0.004}{\pi \cdot 1.569 \cdot 10^{-5} \cdot 0.15} = 180.152$$

Ο μέσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των δύο δίσκων υπολογίζεται μέσω του τύπου:

$$\bar{h}_{rs} = \frac{2k}{D_{out}} \overline{Nu} = \frac{2 \cdot 0.02624}{0.3} \cdot 180.152 = 31.5146 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

3.4.4 Υπολογισμός θερμικών αντιστάσεων και λύση συστήματος εξισώσεων

Όπως έχει αναφερθεί ήδη, για την ανάλυση του θερμικού κυκλώματος θα μοντελοποιηθεί μόνο η μισή διάταξη της ηλεκτρικής μηχανής, λόγω της συμμετρικότητάς της. Αγνοώντας την ακτινοβολία από το δίσκο του δρομέα στην ατμόσφαιρα και τη θερμική αντίσταση αγωγής ανάμεσα στους μαγνήτες και το δρομέα, το γενικό ισοδύναμο θερμικό κύκλωμα είναι το εξής:



Σχήμα 3.4: Απλοποιημένο ισοδύναμο θερμικό κύκλωμα

Μισή διάταξη του στάτη

Η αντίσταση μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής μεταξύ του στάτη και της ροής αέρα στο διάκενο αέρος υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$R_{c1} = \frac{1}{\bar{h}_{rs} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_{out}^2 - D_{in}^2)} = \frac{1}{31.5146 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0.342^2 - 0.166^2)} = 0.452 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$$

όπου για την εξωτερική και εσωτερική διάμετρο του στάτη που αλληλεπιδρά στη μεταφορά της θερμότητας προστέθηκε και αφαιρέθηκε το πάχος της πλευράς του πηνίου (0.021 m) αντίστοιχα.

Η αντίσταση μεταφοράς θερμότητας μέσω ακτινοβολίας μεταξύ του στάτη και των δίσκων του δρομέα είναι:

$$R_{r1} = \frac{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} - \frac{1}{A_1 F_{12}} - \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}}{\sigma [(T_1 + 273) + (T_2 + 273)] [(T_1 + 273)^2 + (T_2 + 273)^2]} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$$

όπου οι επιφάνειες των δίσκων μπορούν να θεωρηθούν ίδιες: $A_1 = A_2 = \frac{\pi}{4} (D_{out}^2 - D_{in}^2) = 0.07 \text{ m}^2$, ο συντελεστής σχήματος $F_{12} = 1$, η σταθερά Stefan-Boltzmann $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$, ο συντελεστής εκπομπής του στάτη $\varepsilon_1 = 0.85$ και του δρομέα, εφόσον ένα μέρος του καλύπτεται από τους μόνιμους μαγνήτες, δίνεται από τον τύπο:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{Fe} (1 - a_i) + \varepsilon_{PM} a_i = 0.3 \cdot 0.341 + 0.9 \cdot 0.659 = 0.6954$$

Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ενέργειας, η εξίσωση μόνιμης κατάστασης για το συγκεκριμένο κομμάτι της διάταξης είναι:

$$\frac{1}{2} (\Delta P_{Cu} + \Delta P_e) - \frac{T_1 - T_2}{R_{c1}} - \frac{T_1 - T_3}{R_{r1}} = 0 \quad (3.9)$$

Διάκενο αέρος

Η αντίσταση μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής από το διάκενο στο δίσκο του δρομέα μπορεί να θεωρηθεί ίση με την περίπτωση της αντίστοιχης αντίστασης από το στάτη στο διάκενο αέρος, δηλαδή $R_{c2} = R_{c1}$. Χρησιμοποιώντας την εξωτερική και εσωτερική διάμετρο του δρομέα σε αυτήν την περίπτωση:

$$R_{c2} = \frac{1}{\bar{h}_{rs} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_{out}^2 - D_{in}^2)} = \frac{1}{31.5146 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0.3^2 - 0.208^2)} = 0.864 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Η μάζα ροής αέρα ισούται με:

$$\dot{m} = \rho Q = 1.177 \cdot 0.004 = 0.004708 \text{ kg}$$

Αν υποθέσουμε ότι η θερμοκρασία του αέρα στις οπές της γεννήτριας είναι ίση με τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας $T_{in} = T_a$ και η μέση θερμοκρασία στο διάκενο του αέρα είναι ίση με $T_2 = \frac{1}{2}(T_{in} + T_{out})$, τότε η διάχυση της θερμότητας λόγω της ροής αέρα είναι:

$$\dot{m}_{out}i_{out} - \dot{m}_{in}i_{in} = \dot{m}c_p(T_{out} - T_{in}) = 2\dot{m}c_p(T_2 - T_a) = 2 \cdot 0.004708 \cdot 1005 \cdot (T_2 - 23)$$

Η εξίσωση μόνιμης κατάστασης για το διάκενο αέρος προκύπτει:

$$\frac{T_1 - T_2}{R_{c1}} - \frac{T_2 - T_3}{R_{c2}} - 2 \cdot 0.004708 \cdot 1005 \cdot (T_2 - 23) = 0 \quad (3.10)$$

Δίσκος του δρομέα

Η αντίδραση μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής από την εξωτερική επιφάνεια του δίσκου στην ατμόσφαιρα είναι:

$$R_{c3} = \frac{4}{\bar{h}_{fr} \cdot \pi \cdot D_{out}^2} = \frac{4}{\bar{h}_{fr} \cdot \pi \cdot 0.3^2} = \frac{14.147}{\bar{h}_{fr}} \text{ } (^\circ\text{C/W})$$

ενώ η αντίδραση μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής από την περιφέρεια του δίσκου στην ατμόσφαιρα υπολογίζεται:

$$R_{c3p} = \frac{4}{\bar{h}_p \cdot \pi \cdot D_{out} \cdot d} = \frac{4}{46.609 \cdot \pi \cdot 0.3 \cdot 0.008} = 11.382 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Αντίστοιχα, σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ενέργειας, η εξίσωση μόνιμης κατάστασης για το δίσκο του δρομέα γράφεται:

$$\frac{T_2 - T_3}{R_{c2}} - \frac{T_1 - T_3}{R_{r1}} + \frac{1}{2} \Delta P_{rot} - \frac{T_3 - T_a}{R_{c3}} - \frac{T_3 - T_a}{R_{c3p}} = 0 \quad (3.11)$$

Οι εξισώσεις (3.9), (3.10), (3.11) που προκύπτουν από την αρχή διατήρησης της ενέργειας, λόγω της πολυπλοκότητάς τους (και της εξάρτησης της R_{r1} από τις T_1 και T_2 , όπως και του

συντελεστή συναγωγής \bar{h}_{fr} από τις T_2 και T_3), θα λυθούν μέσω λογισμικού MATLAB, όπου θα προκύψουν οι θερμοκρασίες μόνιμης κατάστασης του στάτη, του διακένου και του δρομέα. Στον Πίνακα 3.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του θερμικού μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων:

Τμήμα της γεννήτριας	Θερμοκρασία
Στάτης	67.8287 °C
Διάκενο	29.3304 °C
Δρομέας	32.0085 °C

Πίνακας 3.5: Αποτελέσματα προσομοίωσης του μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων για γεννήτρια 600 W.

3.5 Θερμική ανάλυση σύγχρονης γεννήτριας AFPM 5 kW

Η ίδια υπολογιστική διαδικασία θα ακολουθηθεί και εδώ για την ανάπτυξη της θερμικής ανάλυσης μιας γεννήτριας μόνιμων μαγνητών αξονικής ροής 5 kW. Μέσω του μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων θα υπολογιστούν οι τιμές της θερμοκρασίας στη μόνιμη κατάσταση στο στάτη, το διάκενο και το δρομέα. Παρακάτω παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της υπό εξέταση ηλεκτρικής μηχανής:

ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	
Ονομαστικής Ισχύς	5 kW
Ονομαστική Συχνότητα	50 Hz
Αριθμός Πόλων	32
Αριθμός Πηνίων	24
ΔΡΟΜΕΑΣ	
Χαλύβδινοι δίσκοι	
Πάχος Δίσκου	10 mm
Εσωτερική Ακτίνα	290.87 mm
Εξωτερική Ακτίνα	348.87 mm
Μαγνήτες	
Πάχος Μαγνήτη	10 mm
Πλάτος Μαγνήτη	27 mm
Μήκος Μαγνήτη (Ενεργό Μήκος)	58 mm
ΣΤΑΤΗΣ	
Πηνία	
Αξονικό Πάχος Πηνίου	15 mm
Πάχος Πλευράς	22.3693 mm
Αριθμός Σπειρών	26
Διάμετρος Χαλκού	0.95 mm

Πίνακας 3.6: Χαρακτηριστικά γεννήτριας 5 kW.

Οι απώλειες που παρουσιάζει η συγκεκριμένη γεννήτρια για ρεύμα λειτουργίας 40.84 A είναι οι εξής:

Είδος απωλειών	Τιμή
Απώλειες χαλκού (ΔP_{Cu})	1979.24 W
Απώλειες δινορρευμάτων (ΔP_e)	19.4504 W
Απώλειες περιστροφής (ΔP_{rot})	24.8239 W

Πίνακας 3.7: Απώλειες γεννήτριας 5 kW για ρεύμα 40.84 A.

Για τον υπολογισμό των απωλειών χαλκού ήταν αναγκαία η τιμή της αντίστασης φάσης της γεννήτριας. Για τον υπολογισμό της αντίστασης φάσης χρησιμοποιήθηκε ένα βολτόμετρο που μετρούσε τάση και ρεύμα στα άκρα των τριών φάσεων της γεννήτριας 5 kW. Οι μετρήσεις αυτές πάρθηκαν έπειτα από την εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 5, προκειμένου η μηχανή να είναι ζεστή και έτσι οι μετρήσεις να διαθέτουν μεγαλύτερη ακρίβεια, λόγω της εξάρτησης της αντίστασης από τη θερμοκρασία. Κατά αυτόν τον τρόπο, προέκυψαν οι ακόλουθες μετρήσεις και ο υπολογισμός της αντίστασης της κάθε φάσης μέσω του νόμου του Ohm $R = V/I$:

	$I_1(A)$	$V_1(V)$	$R_1(\Omega)$	$I_2(A)$	$V_2(V)$	$R_2(\Omega)$	$I_3(A)$	$V_3(V)$	$R_3(\Omega)$
	0.99	0.4	0.40404	1.02	0.4	0.392157	1.03	0.4	0.38835
	1.98	0.8	0.40404	2	0.8	0.4	2.08	0.8	0.384615
	3.1	1.2	0.387097	3.05	1.2	0.393443	2.98	1.2	0.402685
	4.03	1.6	0.397022	4.06	1.6	0.394089	4.02	1.6	0.39801
MO			0.398086			0.395584			0.392993

Πίνακας 3.8: Αντίσταση φάσης της γεννήτριας.

Επομένως, η μέση αντίσταση της κάθε φάσης είναι $R_{avg} = 0.395554 \Omega$. Τώρα είναι δυνατός ο υπολογισμός των απωλειών χαλκού μέσω της σχέσης:

$$\Delta P_{Cu} = 3 \cdot I^2 R = 3 \cdot 40.84^2 \cdot 0.395554 = 1979.24 W$$

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με αυτήν που παρουσιάστηκε για τη γεννήτρια των 600 W, η τιμή του ονομαστικού ρυθμού ροής του αέρα ισούται με $Q = 0.04 m^3/s$. Η τιμή αυτή είναι λογική, διότι η αύξηση του ρυθμού ροής του αέρα είναι ανάλογη της ακτίνας της γεννήτριας. Επιπλέον, η γεννήτρια αυτή διαθέτει αεραγωγούς πάνω στους δίσκους του δρομέα, που αυξάνουν τη ροή αέρα μέσα από αυτήν και συμβάλλουν στην ψύξη της.

Όπως και προηγουμένως, προκύπτουν τρεις εξισώσεις από την αρχή διατήρησης της ενέργειας, οι οποίες επιλύονται μέσω λογισμικού MATLAB, όπου προκύπτουν οι θερμοκρασίες μόνιμης κατάστασης του στάτη, του διακένου και του δρομέα. Στον Πίνακα

3.9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του θερμικού μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων:

Τμήμα της γεννήτριας	Θερμοκρασία
Στάτης	137.3029 °C
Διάκενο	33.3523 °C
Δρομέας	35.2723 °C

Πίνακας 3.9: Αποτελέσματα προσομοίωσης του μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων για γεννήτρια 5 kW.

Κεφάλαιο 4: Θερμική ανάλυση με μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων

Η θερμική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο μέσω του θερμικού ισοδύναμου κυκλώματος της μεθόδου των συγκεντρωμένων παραμέτρων προσέγγισε τη θερμική συμπεριφορά της γεννήτριας μονίμων μαγνητών. Στο κεφάλαιο αυτό θα πραγματοποιηθεί η θερμική ανάλυση της γεννήτριας σε τρεις διαστάσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Το πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ότι δίνει αποτελέσματα όχι μόνο για τη μόνιμη κατάσταση της θερμικής συμπεριφοράς της γεννήτριας, αλλά και για τη μεταβατική κατάσταση των θερμοκρασιών που επικρατούν στη γεννήτρια. Σε αντίθεση με την προηγούμενη μέθοδο, τα αποτελέσματα διαθέτουν μεγαλύτερη ακρίβεια, ενώ παράλληλα παρέχεται μια λεπτομερής εικόνα για το θερμοκρασιακό επίπεδο και την πυκνότητα της θερμορροής στη γεννήτρια. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας μέσω ακτινοβολίας παραλείπεται, λόγω της αμελητέας συνεισφοράς του σε σύγκριση με τους μηχανισμούς της αγωγής και της συναγωγής. Οπότε, στην παρακάτω ανάλυση μόνο αυτοί οι δύο μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας λαμβάνονται υπόψη.

4.1 Μετάδοση θερμότητας στο εσωτερικό της μηχανής

Στη γενική περίπτωση μιας ηλεκτρικής μηχανής, οι κύριες πηγές θερμότητας είναι οι απώλειες χαλκού και σιδήρου. Στη συγκεκριμένη γεννήτρια που βρίσκεται υπό εξέταση, όπου δεν υπάρχει πυρήνας σιδήρου, η μόνη πηγή θερμότητας που υπάρχει είναι οι απώλειες του χαλκού. Η παραγόμενη θερμότητα μεταφέρεται, όπως έχει ήδη αναφερθεί, στα διάφορα μέρη της γεννήτριας μέσω των μηχανισμών της αγωγής και της συναγωγής. Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια σύντομη υπενθύμιση των μηχανισμών αυτών και παρουσίαση των τύπων που τους χαρακτηρίζουν, καθώς και των οριακών συνθηκών που χρησιμοποιούνται για την ακριβέστερη προσέγγιση της θερμικής συμπεριφοράς της γεννήτριας. Έπειτα, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και τα εξαγόμενα από αυτά συμπεράσματα.

4.1.1 Μετάδοση θερμότητας μέσω του μηχανισμού της αγωγής

Όπως αναφέρθηκε και στο 2^ο κεφάλαιο, η μετάδοση θερμότητας μέσω αγωγής παρατηρείται στο εσωτερικό ενός στερεού σώματος μεταξύ δύο περιοχών με διαφορετική θερμοκρασία. Παρακάτω γίνεται μια σύντομη αναφορά και πάλι στους τύπους που διέπουν το φαινόμενο της αγωγής.

Ο γενικός τύπος της αγωγής σε τρισδιάστατο πρόβλημα προκύπτει από την αρχή διατήρησης της ενέργειας:

$$k \cdot \nabla^2 T + q = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.1)$$

όπου $k \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, $\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ η πυκνότητα και $c_p \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$ η ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού.

Αν το υλικό μέσο θεωρηθεί ομογενές και συνεπώς ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ανεξάρτητος της θέσης στο χώρο, τότε η προηγούμενη σχέση απλοποιείται και προκύπτει:

$$k \cdot \nabla^2 T + q = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \Leftrightarrow \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q}{\lambda} = \frac{\rho}{\lambda} \cdot \frac{c_p}{\lambda} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.2)$$

Στην περίπτωση που θεωρηθεί ότι η θερμική ανάλυση πραγματοποιείται μόνο για τη μόνιμη κατάσταση, προκύπτει $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$, δηλαδή η παράγωγος της θερμοκρασίας ισούται με μηδέν. Επομένως, η σχέση (4.2) παίρνει τη μορφή της εξίσωσης Poisson:

$$\nabla^2 T + \frac{q}{\lambda} = 0 \quad (4.3)$$

Αν θεωρηθεί ότι στο εσωτερικό του στερεού δεν υπάρχουν πηγές θερμότητας, η σχέση (4.2) παίρνει τη μορφή της εξίσωσης Fourier:

$$\nabla^2 T = \frac{\rho \cdot c_p}{\lambda} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.4)$$

Στη μόνιμη κατάσταση και στην περίπτωση απουσίας πηγών θερμότητας στο εσωτερικό του υλικού, προκύπτει η εξίσωση Laplace:

$$\nabla^2 T = 0 \quad (4.5)$$

4.1.2 Μετάδοση θερμότητας μέσω του μηχανισμού της συναγωγής

Η μεταφορά θερμότητας μέσω του μηχανισμού της συναγωγής γίνεται μεταξύ ρευστών. Ο μηχανισμός αυτός περιγράφεται από τον τύπο του Newton για την ψύξη των σωμάτων:

$$q = h \cdot (T_{solid} - T_{fluid}) \quad (4.6)$$

όπου $q \left[\frac{W}{m^2} \right]$ η πυκνότητα της θερμορροής, $h \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$ ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής, T_{solid} η θερμοκρασία του σώματος και T_{fluid} η θερμοκρασία του ρευστού που έρχεται σε επαφή.

Θεωρώντας ότι η μετάδοση της θερμότητας γίνεται μόνο σε μία διάσταση, κάθετη στην επιφάνεια του ρευστού, τότε προκύπτει η σχέση:

$$-\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = h \cdot (T_{solid} - T_{fluid}) \quad (4.7)$$

όπου λ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού της επιφάνειας αυτής.

4.2 Οριακές συνθήκες θερμικού προβλήματος

Η χρήση οριακών συνθηκών στις επιφάνειες επαφής διαφορετικών υλικών είναι απαραίτητη για την πραγματοποίηση της θερμικής ανάλυσης και την εξαγωγή σωστών αποτελεσμάτων. Για μονοδιάστατο πρόβλημα και επιφάνεια επαφής που βρίσκεται στη θέση $x = 0$ έχουμε τις εξής οριακές συνθήκες στη γενική περίπτωση:

- Συνθήκη σταθερής θερμοκρασίας ή Dirichlet:

$$T(0, t) = T_{solid}$$

- Συνθήκη σταθερής πυκνότητας θερμορροής ή Neumann:

$$\left[-\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{x=0} = q$$

- Συνθήκη συναγωγής στην επιφάνεια:

$$\left[-\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{x=0} = h \cdot [T(0, t) - T_{fluid}]$$

- Εκπομπή ακτινοβολίας προς το περιβάλλον:

$$\left[-\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{x=0} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot [T(0, t)^4 - T_{fluid}^4]$$

όπου σ η σταθερά Stephan-Boltzmann και ε ο συντελεστής ακτινοβολίας.

4.3 Κώδικας πεπερασμένων στοιχείων

Ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη διπλωματική για τη θερμική ανάλυση της γεννήτριας μονίμων μαγνητών χρησιμοποιεί τις ανωτέρω σχέσεις και οριακές συνθήκες. Οι τρισδιάστατες σχεδιάσεις των δύο γεννητριών, 600 W και 5 kW, εισάγονται στο πρόγραμμα στο οποίο γίνεται η θερμική ανάλυση. Εκεί ορίζονται οι παράμετροι εισόδου, γίνεται χρήση των παραπάνω σχέσεων και μέσω αυτών εξάγονται τα αποτελέσματα σταθερής και μεταβατικής κατάστασης. Ως παράμετροι εισόδου στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων θεωρούνται τα εξής δεδομένα:

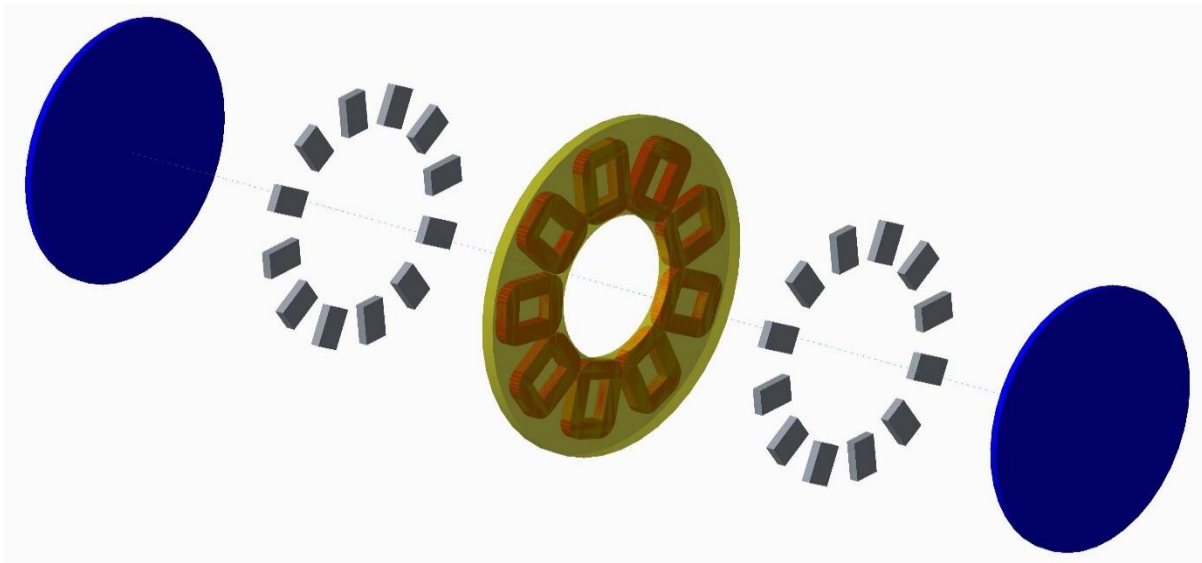
- Τα υλικά της γεννήτριας και οι ιδιότητές τους
- Οι απώλειες της γεννήτριας, που λογίζονται ως πηγές θερμότητας στο εσωτερικό της
- Γνωστές θερμοκρασίες σε κάποιο μέρος της γεννήτριας ή του περιβάλλοντος
- Οι οριακές συνθήκες
- Οι συντελεστές συναγωγής που καθορίζουν τη μετάδοση θερμότητας μεταξύ στερεών και ρευστών

Η σχεδίαση της γεννήτριας αναλύεται σε χιλιάδες μικρά πεπερασμένα στοιχεία, με βάση τη γεωμετρία της μηχανής και τους παραπάνω συντελεστές που έχουν καθοριστεί. Σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο εφαρμόζονται οι σχέσεις αγωγής και συναγωγής και μέσω της επαναληπτικής μεθόδου Newton-Raphson επιτυγχάνεται η σύγκλιση για τις τελικές τιμές της θερμοκρασίας σε κάθε σημείο της γεννήτριας. Αποτέλεσμα της μεθόδου αυτής είναι η γνώση του θερμοκρασιακού πεδίου, της πυκνότητας θερμορροής και της θερμοκρασίας κάθε μέρους της γεννήτριας.

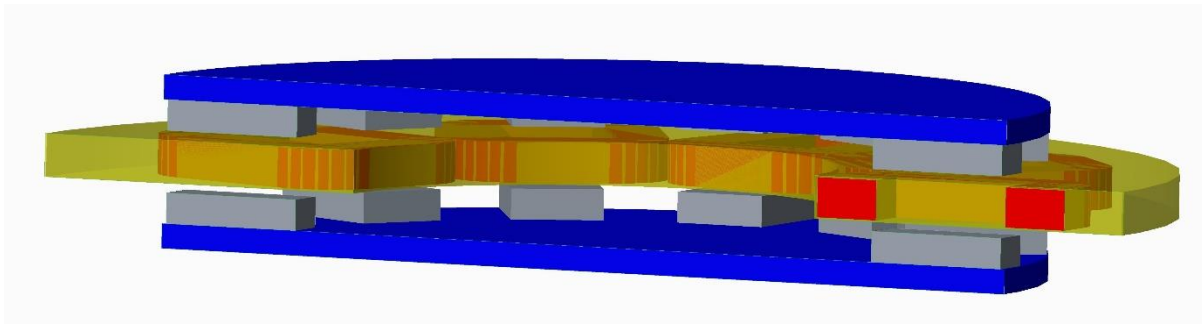
4.4 Σχεδίαση γεννήτριας

Οι τρισδιάστατες σχεδιάσεις των γεννητριών πραγματοποιήθηκαν μέσω του λογισμικού σχεδίασης PTC Creo Parametric 3.0. Έπειτα, οι σχεδιάσεις αυτές εισήχθησαν στο πρόγραμμα ANSYS 15.0, όπου πραγματοποιήθηκε η θερμική ανάλυση.

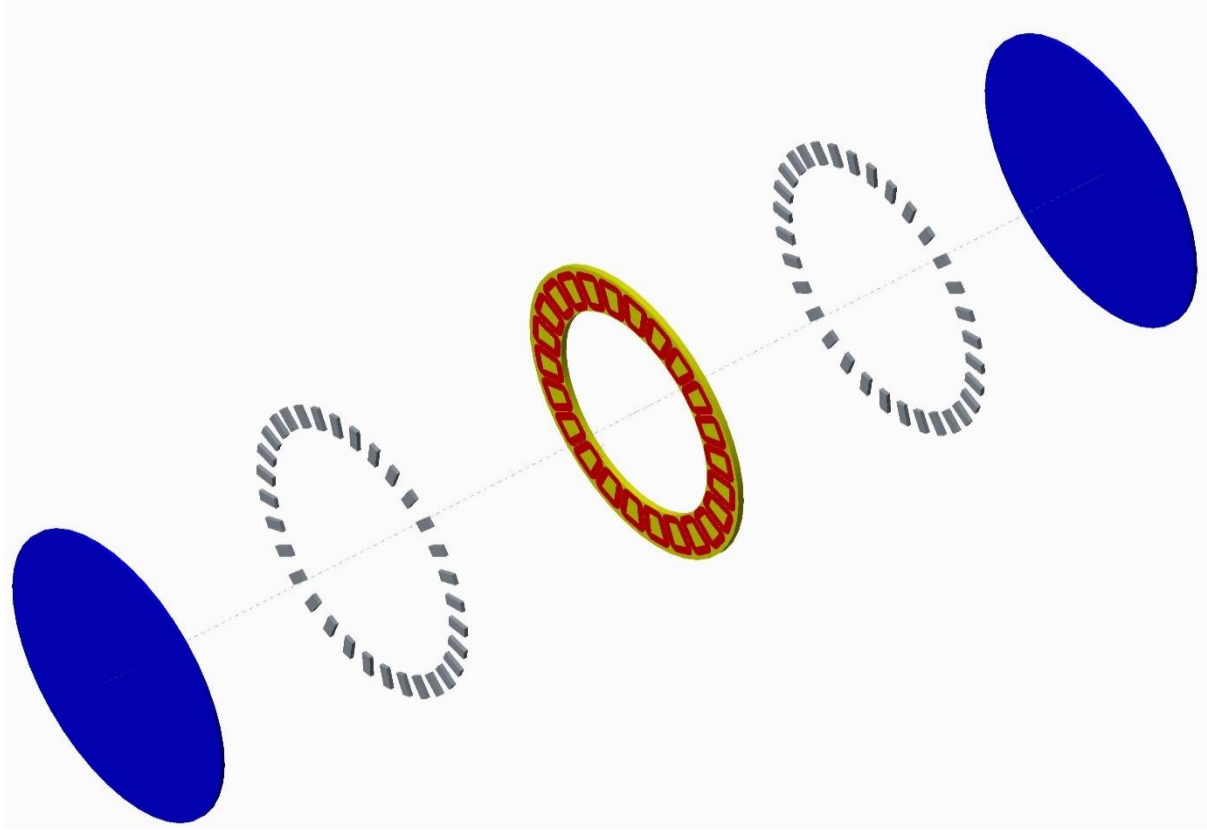
Παρακάτω θα παρουσιαστούν δύο διαφορετικές όψεις για την κάθε γεννήτρια που σχεδιάστηκε, μία ανεπτυγμένη όψη και μία αξονοσυμμετρική τομή της γεννήτριας, δηλαδή μια τομή παράλληλη με τον άξονα της γεννήτριας που την κόβει στη μέση:



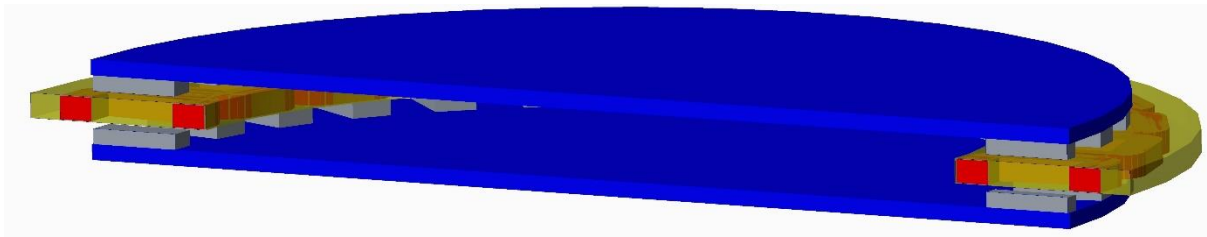
Σχήμα 4.1: Ανεπτυγμένη όψη της γεννήτριας 600 W.



Σχήμα 4.2: Αξονοσυμμετρική τομή της γεννήτριας 600 W.



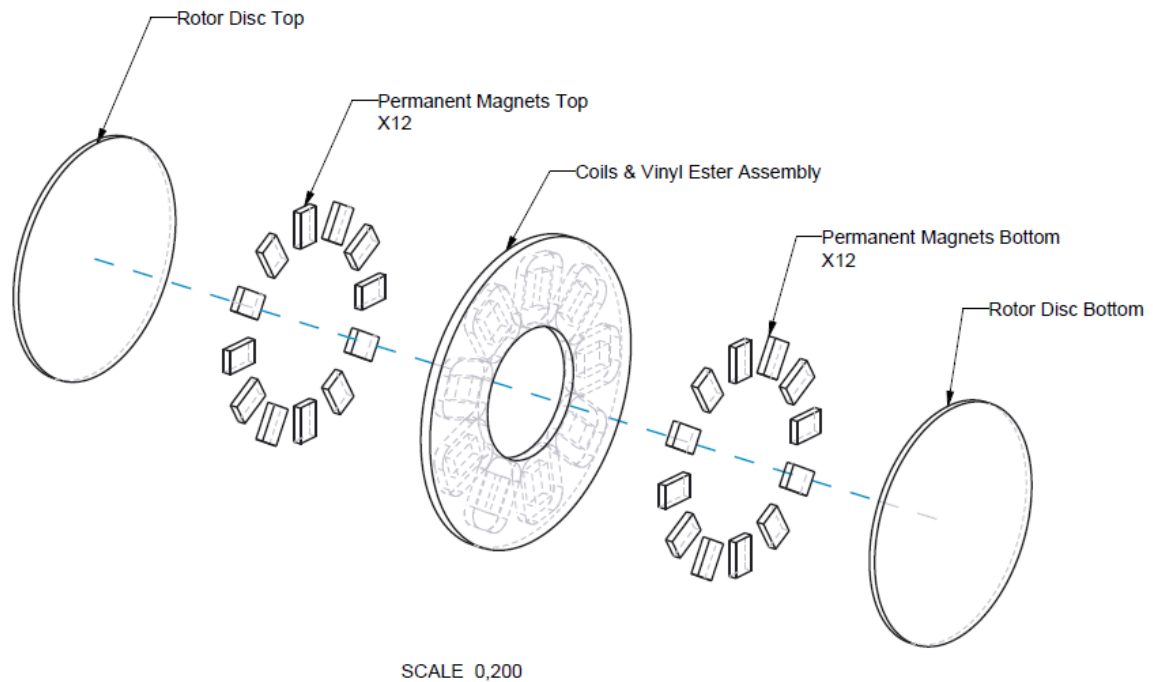
Σχήμα 4.3: Ανεπτυγμένη όψη της γεννήτριας 5 kW.



Σχήμα 4.4: Αξονοσυμμετρική τομή της γεννήτριας 5 kW.

4.4.1 Χαρακτηριστικά σύγχρονης γεννήτριας AFPM 600W

Παρακάτω παρατίθεται μια ακόμη ανεπτυγμένη όψη της γεννήτριας αξονικής ροής μονίμων μαγνητών ισχύος 600 W, όπου παρουσιάζεται αναλυτικά η δομή της, καθώς και ο αριθμός των μαγνητών στο δρομέα:



Σχήμα 4.5: Ανεπτυγμένη όψη της γεννήτριας 600 W, με σημειωμένη την ονομασία του κάθε μέρους της.

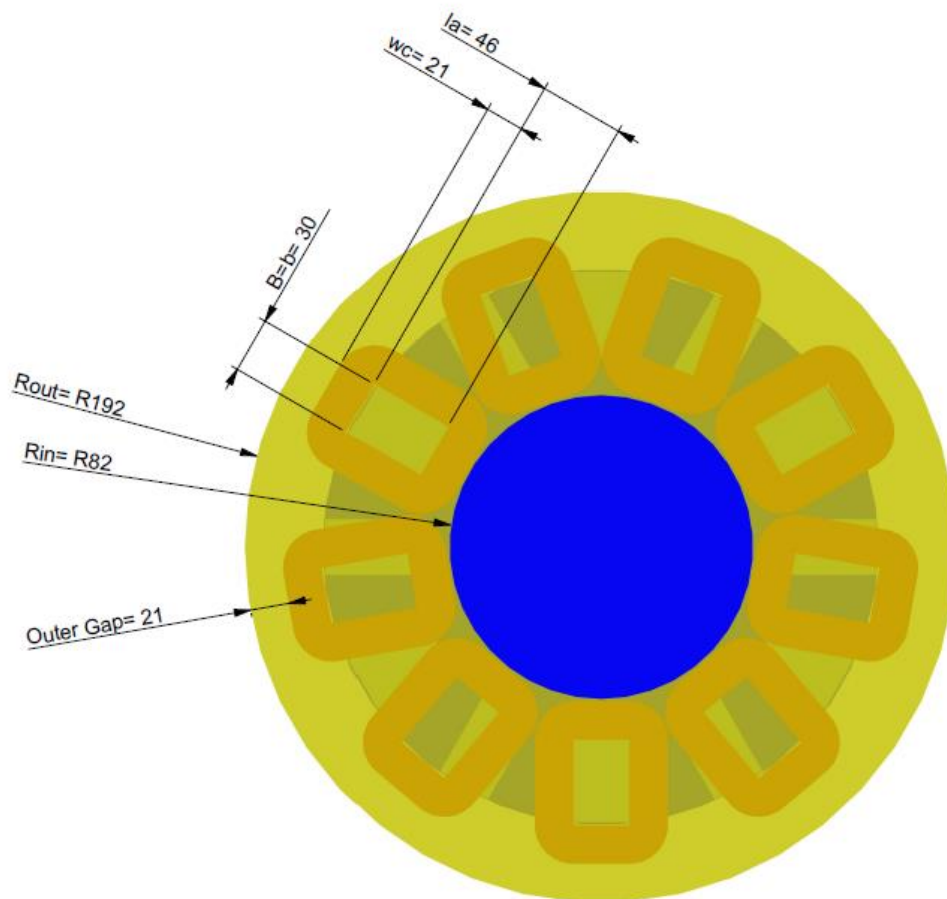
Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά οι διαστάσεις της γεννήτριας 600 W, όπως αυτή σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα σχεδίασης:

ΔΡΟΜΕΑΣ		
Δίσκοι		
Ακτίνα	R_{disc}	150 mm
Πάχος δίσκου	h_r	8 mm
Μαγνήτες		
Πάχος μαγνήτη	h_m	10 mm
Πλάτος μαγνήτη	w_m	30 mm
Μήκος μαγνήτη	l_a	46 mm
ΣΤΑΤΗΣ		
Ρητίνη		
Εξωτερική ακτίνα στάτη	R_{out}	192 mm
Εσωτερική ακτίνα στάτη	R_{in}	82 mm
Πάχος ρητίνης	<i>Resin Thickness</i>	14 mm
Εξωτερική απόσταση τυλίγματος-αέρα	<i>Outer Gap</i>	21 mm
Εσωτερική απόσταση τυλίγματος-αέρα	<i>Inner Gap</i>	1 mm
Χαλκός		
Αξονικό πάχος πηνίου	t_w	13 mm
Πάχος πλευράς	w_c	21 mm
Μεγάλη βάση εσωτερικού τραpezίου	B	30 mm
Μικρή βάση εσωτερικού τραpezίου	b	30 mm
Ενεργό μήκος	l_a	46 mm
Συντελεστής πλήρωσης	ff	0.55

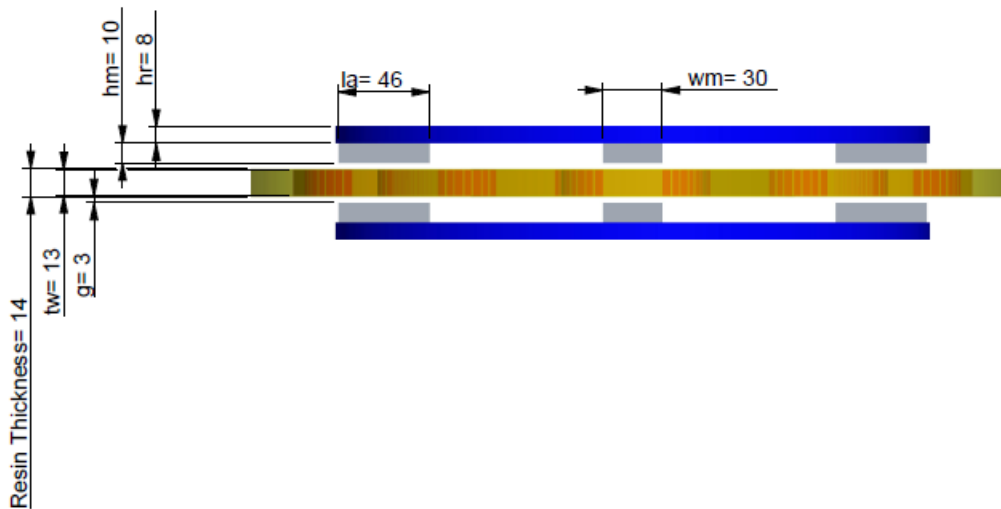
ΔΙΑΚΕΝΟ		
Μήκος διακένου	g	3 mm

Πίνακας 4.1: Διαστάσεις γεννήτριας 600 W.

Οι ανωτέρω διαστάσεις φαίνονται και στις ακόλουθες δύο τομές της γεννήτριας, μία κάθετη στον άξονα της γεννήτριας και μία αξονοσυμμετρική αντίστοιχα:



Σχήμα 4.6: Τομή κάθετη στον άξονα της γεννήτριας 600 W, με σημειωμένες τις διαστάσεις της.



Σχήμα 4.7: Αξονοσυμμετρική τομή της γεννήτριας 600 W, με σημειωμένες τις διαστάσεις της.

Με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων θα πραγματοποιηθούν θερμικές αναλύσεις για τις διάφορες γεννήτριες, όπως έγινε και με τη μέθοδο συγκεντρωμένων παραμέτρων. Για να οριστεί το θερμικό πρόβλημα πρέπει να οριστούν οι συνθήκες λειτουργίας της γεννήτριας, καθώς και οι αρχικές και οι οριακές συνθήκες που επικρατούν στη γεωμετρία.

Η θερμική συμπεριφορά της γεννήτριας των 600 W εξετάζεται για ρεύματα λειτουργίας 7.03 A, 7.72 A και 8.96 A:

Για ρεύμα λειτουργίας $I=7.03 A$

Στοιχεία λειτουργίας της γεννήτριας

Το ρεύμα στα τυλίγματα χαλκού είναι $I = 7.03 A$ και οι αντίστοιχες απώλειες χαλκού:

$$\Delta P_{Cu} = 3 \cdot I^2 R = 3 \cdot 7.03^2 \cdot 0.6951 = 103.057 W$$

Στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων οι απώλειες χαλκού θα θεωρηθούν ως η μόνη πηγή θερμότητας στη γεννήτρια, επομένως η εσωτερική παραγωγή θερμότητας στα τυλίγματα του χαλκού προκύπτει:

$$\begin{aligned} \text{Internal Heat Generation} &= \frac{\text{Απώλειες χαλκού}}{\text{Όγκος χαλκού}} = \frac{103.057 W}{0.55 * 9 * 5.9463 * 10^{-5} m^3} \\ &= \mathbf{350126.9018} \frac{W}{m^3} \end{aligned}$$

όπου για τον υπολογισμό του όγκου του χαλκού αρχικά υπολογίστηκε ο όγκος του ενός τυλίγματος με βάση τη γεωμετρία και τις δοθείσες διαστάσεις και εν συνεχεία

πολλαπλασιάστηκε με το πλήθος των τυλιγμάτων στη συγκεκριμένη γεννήτρια, καθώς και με το συντελεστή πλήρωσης, ώστε να βρεθεί η παραγόμενη θερμότητα ανά μονάδα όγκου του χαλκού.

Ορισμός αρχικών και οριακών συνθηκών προβλήματος

Ως αρχικές συνθήκες ορίζονται η αρχική θερμοκρασία της γεννήτριας στους 23 °C και του περιβάλλοντος επίσης στους 23 °C. Οι επιλογές αυτές γίνονται ώστε να προσομοιωθούν όσο το δυνατόν καλύτερα οι συνθήκες που επικρατούσαν κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων και να μπορούν να συγκριθούν με περισσότερη ακρίβεια τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις δύο διαδικασίες.

Για να προκύψουν αξιόπιστα αποτελέσματα από τη θερμική ανάλυση πρέπει να υπάρχουν καλά ορισμένες οριακές συνθήκες. Στη συγκεκριμένη ανάλυση της γεννήτριας AFPM 600 W ορίζονται οι εξής οριακές συνθήκες:

- **Επιφάνεια επαφής χαλκού-ρητίνης:** Στην περιοχή αυτή υπάρχει αγωγή θερμότητας μέσω αγωγής και επομένως ορίζεται η πυκνότητα ροής θερμότητας ως εξής:

$$\begin{aligned} \text{Heat Flux} &= \frac{\text{Απώλειες χαλκού}}{\text{Εμβαδό επιφάνειας επαφής}} = -\frac{103.057 \text{ W}}{0.133329699 \text{ m}^2} \\ &= -772.9486 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \end{aligned}$$

όπου το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει ότι η θερμότητα απάγεται από τα σώματα του χαλκού και εισρέει στη ρητίνη. Το εμβαδό της επιφάνειας επαφής υπολογίζεται από τη γεωμετρία των τυλιγμάτων του χαλκού.

- **Σύστημα δρομέα-στάτη:** Στις επιφάνειες επαφής της ρητίνης, των μαγνητών και του δίσκου του δρομέα με τον αέρα ορίζεται συντελεστής θερμικής συναγωγής: $h_{rs} = 31.5147 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$
- **Επιφάνεια επαφής περιφέρειας δίσκου δρομέα με αέρα:** Εδώ ορίζεται συντελεστής συναγωγής: $h_p = 46.609 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$
- **Επιφάνεια επαφής εξωτερικής πλευράς δίσκου δρομέα με αέρα:** Ο συντελεστής συναγωγής στην επιφάνεια αυτή ορίζεται ως: $h_{fr} = 19.1805 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$

Οι υπολογισμοί των παραπάνω συντελεστών έγιναν με βάση τη μέθοδο που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3 για δισκοειδή συστήματα, όπου εισήχθησαν οι απώλειες χαλκού για ρεύμα λειτουργίας $I = 7.03\text{A}$ και ο ρυθμός ροής αέρα $Q = 0.004 \text{ m}^3/\text{s}$ παρέμεινε ίδιος για τη γεννήτρια 600 W. Η θεώρηση αυτή έγινε λόγω της δυσκολίας πειραματικής εξακρίβωσης

των συντελεστών συναγωγής, που προκύπτει λόγω του πολύπλοκου προσδιορισμού του ονομαστικού ρυθμού ροής αέρα που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3.

Για ρεύμα λειτουργίας $I=7.72 A$

Στοιχεία λειτουργίας της γεννήτριας

Το ρεύμα στα τυλίγματα χαλκού είναι $I = 7.72 A$ και οι αντίστοιχες απώλειες χαλκού:

$$\Delta P_{Cu} = 3 \cdot I^2 R = 3 \cdot 7.72^2 \cdot 0.6951 = 124.281 W$$

Στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων οι απώλειες χαλκού θα θεωρηθούν ως η μόνη πηγή θερμότητας στη γεννήτρια, επομένως η εσωτερική παραγωγή θερμότητας στα τυλίγματα του χαλκού προκύπτει:

$$\begin{aligned} \text{Internal Heat Generation} &= \frac{\text{Απώλειες χαλκού}}{\text{Όγκος χαλκού}} = \frac{124.281 W}{0.55 * 9 * 5.9463 * 10^{-5} m^3} \\ &= 422233.5356 \frac{W}{m^3} \end{aligned}$$

Ορισμός αρχικών και οριακών συνθηκών προβλήματος

Ως αρχικές συνθήκες ορίζονται η αρχική θερμοκρασία της γεννήτριας στους 25 °C και του περιβάλλοντος στους 23 °C. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι τιμές αυτές εισάγονται στο θερμικό πρόβλημα έτσι ώστε να προσομοιωθούν όσο το δυνατόν καλύτερα οι συνθήκες που επικρατούσαν κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων και να μπορούν να συγκριθούν με περισσότερη ακρίβεια τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις δύο διαδικασίες.

Στο συγκεκριμένο θερμικό πρόβλημα της γεννήτριας AFPM 600W ορίζονται οι εξής οριακές συνθήκες:

- **Επιφάνεια επαφής χαλκού-ρητίνης:** Η πυκνότητα ροής θερμότητας ορίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \text{Heat Flux} &= \frac{\text{Απώλειες χαλκού}}{\text{Εμβαδό επιφάνειας επαφής}} = - \frac{124.281 W}{0.133329699 m^2} \\ &= -932.1329 \frac{W}{m^2} \end{aligned}$$

- **Σύστημα δρομέα-στάτη:** Στις επιφάνειες επαφής της ρητίνης, των μαγνητών και του δίσκου του δρομέα με τον αέρα ορίζεται συντελεστής θερμικής συναγωγής: $h_{rs} = 31.5147 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$

- **Επιφάνεια επαφής περιφέρειας δίσκου δρομέα με αέρα:** Εδώ ορίζεται συντελεστής συναγωγής: $h_p = 46.609 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$
- **Επιφάνεια επαφής εξωτερικής πλευράς δίσκου δρομέα με αέρα:** Ο συντελεστής συναγωγής στην επιφάνεια αυτή ορίζεται ως: $h_{fr} = 19.1803 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$

Ως γνωστόν, οι υπολογισμοί των παραπάνω συντελεστών έγιναν με βάση τη μέθοδο που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3 για δισκοειδή συστήματα. Αυτή τη φορά οι υπολογισμοί έγιναν με βάση τις απώλειες χαλκού να είναι ίσες με $\Delta P_{Cu} = 124.281 W$.

Για ρεύμα λειτουργίας $I=8.96 A$

Στοιχεία λειτουργίας της γεννήτριας

Το ρεύμα στα τυλίγματα χαλκού είναι $I = 8.96 A$ και οι αντίστοιχες απώλειες χαλκού:

$$\Delta P_{Cu} = 3 \cdot I^2 R = 3 \cdot 8.96^2 \cdot 0.6951 = 167.411 W$$

Η εσωτερική παραγωγή θερμότητας στα τυλίγματα του χαλκού δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} \text{Internal Heat Generation} &= \frac{\text{Απώλειες χαλκού}}{\text{Όγκος χαλκού}} = \frac{167.411 W}{0.55 * 9 * 5.9463 * 10^{-5} m^3} \\ &= 568763.837 \frac{W}{m^3} \end{aligned}$$

Ορισμός αρχικών και οριακών συνθηκών προβλήματος

Ως αρχικές συνθήκες ορίζονται η αρχική θερμοκρασία της γεννήτριας στους $28^\circ C$ και του περιβάλλοντος στους $23^\circ C$.

Οι οριακές συνθήκες της ανάλυσης αυτής είναι οι εξής:

- **Επιφάνεια επαφής χαλκού-ρητίνης:** Η πυκνότητα ροής θερμότητας ισούται με:

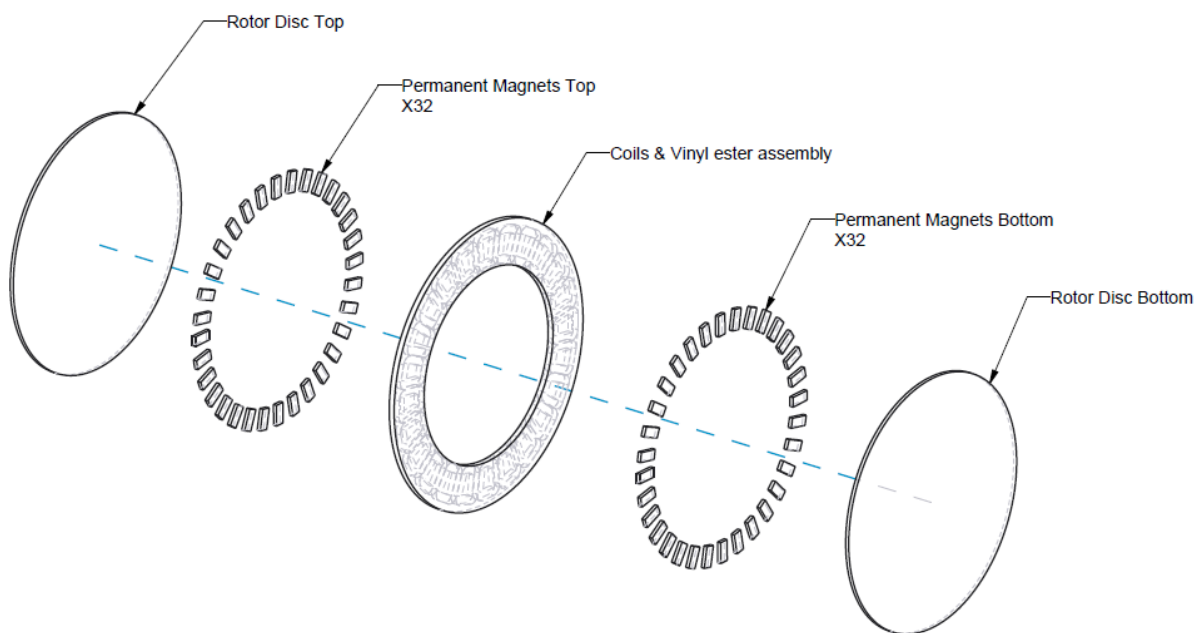
$$\begin{aligned} \text{Heat Flux} &= \frac{\text{Απώλειες χαλκού}}{\text{Εμβαδό επιφάνειας επαφής}} = - \frac{167.411 W}{0.133329699 m^2} \\ &= -1255.616725 \frac{W}{m^2} \end{aligned}$$

- **Σύστημα δρομέα-στάτη:** Στις επιφάνειες επαφής της ρητίνης, των μαγνητών και του δίσκου του δρομέα με τον αέρα ορίζεται συντελεστής θερμικής συναγωγής: $h_{rs} = 31.5147 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$
- **Επιφάνεια επαφής περιφέρειας δίσκου δρομέα με αέρα:** Εδώ ορίζεται συντελεστής συναγωγής: $h_p = 46.609 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$
- **Επιφάνεια επαφής εξωτερικής πλευράς δίσκου δρομέα με αέρα:** Ο συντελεστής συναγωγής στην επιφάνεια αυτή ορίζεται ως: $h_{fr} = 19.1799 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$

Οι υπολογισμοί των παραπάνω συντελεστών έγιναν με βάση τη μέθοδο που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3 για δισκοειδή συστήματα για απώλειες χαλκού $\Delta P_{Cu} = 167.411 W$.

4.4.2 Χαρακτηριστικά σύγχρονης γεννήτριας AFPM 5kW

Η ανεπτυγμένη όψη της γεννήτριας αξονικής ροής μονίμων μαγνητών ισχύος 5 kW παρουσιάζεται παρακάτω:



SCALE 0,100

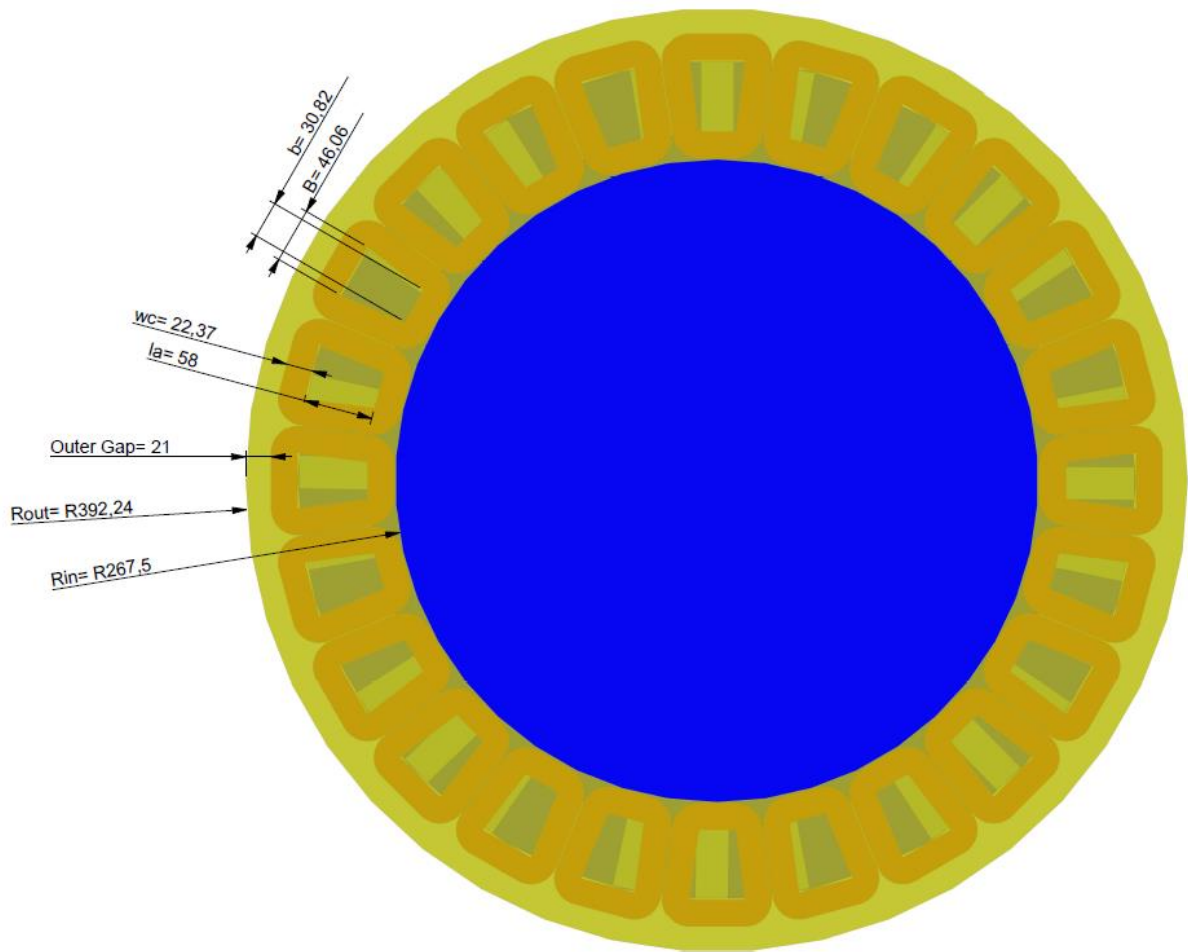
Σχήμα 4.8: Ανεπτυγμένη όψη της γεννήτριας 5 kW, με σημειωμένη την ονομασία του κάθε μέρους της.

Με βάση τις διαστάσεις που παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα γίνεται η σχεδίαση της γεννήτριας στο Creo Parametric:

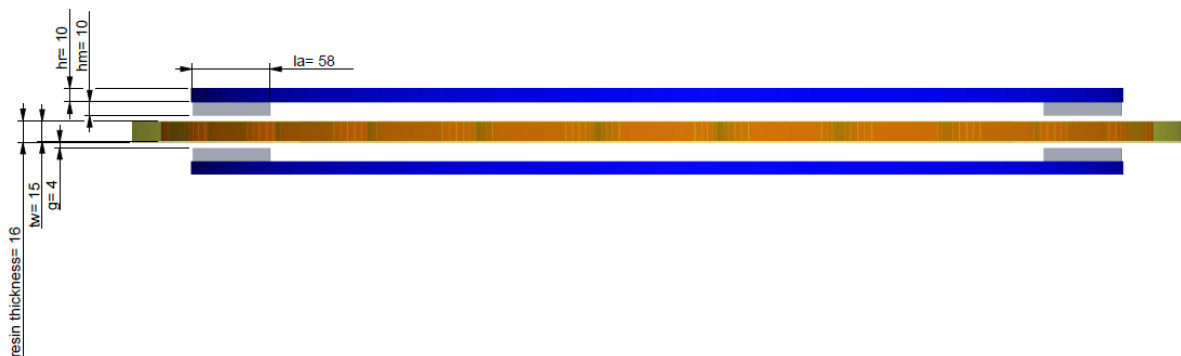
ΔΡΟΜΕΑΣ			
Δίσκοι			
Ακτίνα	R_{disc}		348.87 mm
Πάχος δίσκου	h_r		10 mm
Μαγνήτες			
Πάχος μαγνήτη	h_m		10 mm
Πλάτος μαγνήτη	w_m		27 mm
Μήκος μαγνήτη	l_a		58 mm
ΣΤΑΤΗΣ			
Ρητίνη			
Εξωτερική ακτίνα στάτη	R_{out}		392.24 mm
Εσωτερική ακτίνα στάτη	R_{in}		267.5 mm
Πάχος ρητίνης	<i>Resin Thickness</i>		16 mm
Εξωτερική απόσταση τυλίγματος-αέρα	<i>Outer Gap</i>		21 mm
Εσωτερική απόσταση τυλίγματος-αέρα	<i>Inner Gap</i>		1 mm
Χαλκός			
Αξονικό πάχος πηνίου	t_w		15 mm
Πάχος πλευράς	w_c		22.37 mm
Μεγάλη βάση εσωτερικού τραpezίου	B		46.06 mm
Μικρή βάση εσωτερικού τραpezίου	b		30.82 mm
Ενεργό μήκος	l_a		58 mm
Συντελεστής πλήρωσης	ff		0.47
ΔΙΑΚΕΝΟ			
Μήκος διακένου	g		4 mm

Πίνακας 4.2: Διαστάσεις γεννήτριας 5 kW.

Οι διαστάσεις της γεννήτριας που αναφέρθηκαν ανωτέρω παρουσιάζονται στις παρακάτω τομές της:



Σχήμα 4.9: Τομή κάθετη στον άξονα της γεννήτριας 5 kW, με σημειωμένες τις διαστάσεις της.



Σχήμα 4.10: Αξονοσυμμετρική τομή της γεννήτριας 5 kW, με σημειωμένες τις διαστάσεις της.

Στοιχεία λειτουργίας της γεννήτριας

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, στόχος της συγκεκριμένης ανάλυσης είναι η όσο το δυνατόν ακριβέστερη προσομοίωση των πειραματικών συνθηκών. Έτσι, εν προκειμένω θα εξεταστεί η λειτουργία της γεννήτριας για ρεύμα στα τυλίγματα του χαλκού $I = 40.84 \text{ A}$. Άρα, οι απώλειες χαλκού, όπως υπολογίστηκαν στο Κεφάλαιο 3, είναι:

$$\Delta P_{Cu} = 1979.24 \text{ W}$$

Ως γνωστόν, οι απώλειες χαλκού στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων θεωρούνται ως η μόνη πηγή θερμότητας στην γεννήτρια, επομένως η εσωτερική παραγωγή θερμότητας στα τυλίγματα του χαλκού προκύπτει:

$$\begin{aligned} \text{Internal Heat Generation} &= \frac{\text{Απώλειες χαλκού}}{\text{Όγκος χαλκού}} = \frac{1979.24 \text{ W}}{0.47 \cdot 24 \cdot 8.85782 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3} \\ &= \mathbf{1980899.804} \frac{\text{W}}{\text{m}^3} \end{aligned}$$

όπου ο υπολογισμός του όγκου του χαλκού προκύπτει από τον όγκο του ενός τυλίγματος επί τον αριθμό των τυλιγμάτων επί το συντελεστή πλήρωσης.

Ορισμός αρχικών και οριακών συνθηκών προβλήματος

Στο πείραμα που διεξήχθη για τη γεννήτρια AFPM 5 kW η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ήταν ίση με 23 °C, ενώ η αρχική θερμοκρασία της γεννήτριας ήταν ίση με 25 °C. Ως γνωστόν, οι επιλογές αυτές γίνονται ώστε να προσομοιωθούν όσο το δυνατόν καλύτερα οι συνθήκες που επικρατούσαν κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων και να μπορούν να συγκριθούν με περισσότερη ακρίβεια τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις δύο διαδικασίες.

Στη συγκεκριμένη ανάλυση της γεννήτριας AFPM 5 kW ορίζονται οι εξής οριακές συνθήκες:

- **Επιφάνεια επαφής χαλκού-ρητίνης:** Στην περιοχή αυτή υπάρχει αγωγή θερμότητας μέσω αγωγής και επομένως ορίζεται η πυκνότητα ροής θερμότητας ως εξής:

$$\begin{aligned} \text{Heat Flux} &= \frac{\text{Απώλειες χαλκού}}{\text{Εμβαδό επιφάνειας επαφής}} = - \frac{1979.24 \text{ W}}{0.47361324 \text{ m}^2} \\ &= \mathbf{-4179.021684} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \end{aligned}$$

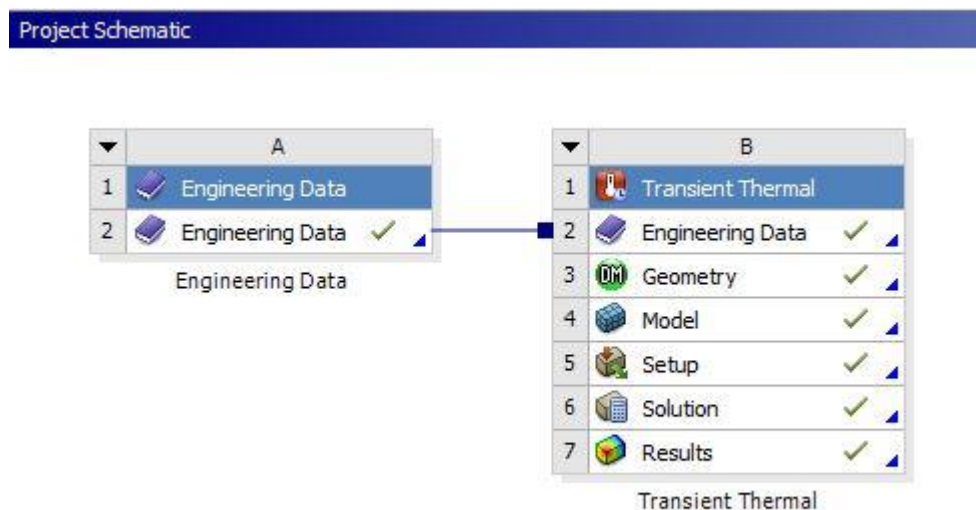
- **Σύστημα δρομέα-στάτη:** Στις επιφάνειες επαφής της ρητίνης, των μαγνητών και του δίσκου του δρομέα με τον αέρα ορίζεται συντελεστής θερμικής συναγωγής: $h_{rs} = 58.2597 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$

- **Επιφάνεια επαφής περιφέρειας δίσκου δρομέα με αέρα:** Εδώ ορίζεται συντελεστής συναγωγής: $h_p = 32.113 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$
- **Επιφάνεια επαφής εξωτερικής πλευράς δίσκου δρομέα με αέρα:** Ο συντελεστής συναγωγής στην επιφάνεια αυτή ορίζεται ως: $h_{fr} = 11.7482 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$

Οι υπολογισμοί των παραπάνω συντελεστών έγιναν με βάση τη μέθοδο που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3 για δισκοειδή συστήματα. Οι απώλειες χαλκού είναι ίσες με $\Delta P_{Cu} = 1979.24 W$ και ο ρυθμός ροής του αέρα όπως περιγράφηκε προηγουμένως έχει τιμή $Q = 0.04 m^3/s$.

4.5 Αποτελέσματα τρισδιάστατης θερμικής ανάλυσης

Η επιφάνεια εργασίας του ANSYS Workbench 15.0 παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.11:



Σχήμα 4.11: Η επιφάνεια εργασίας του ANSYS Workbench.

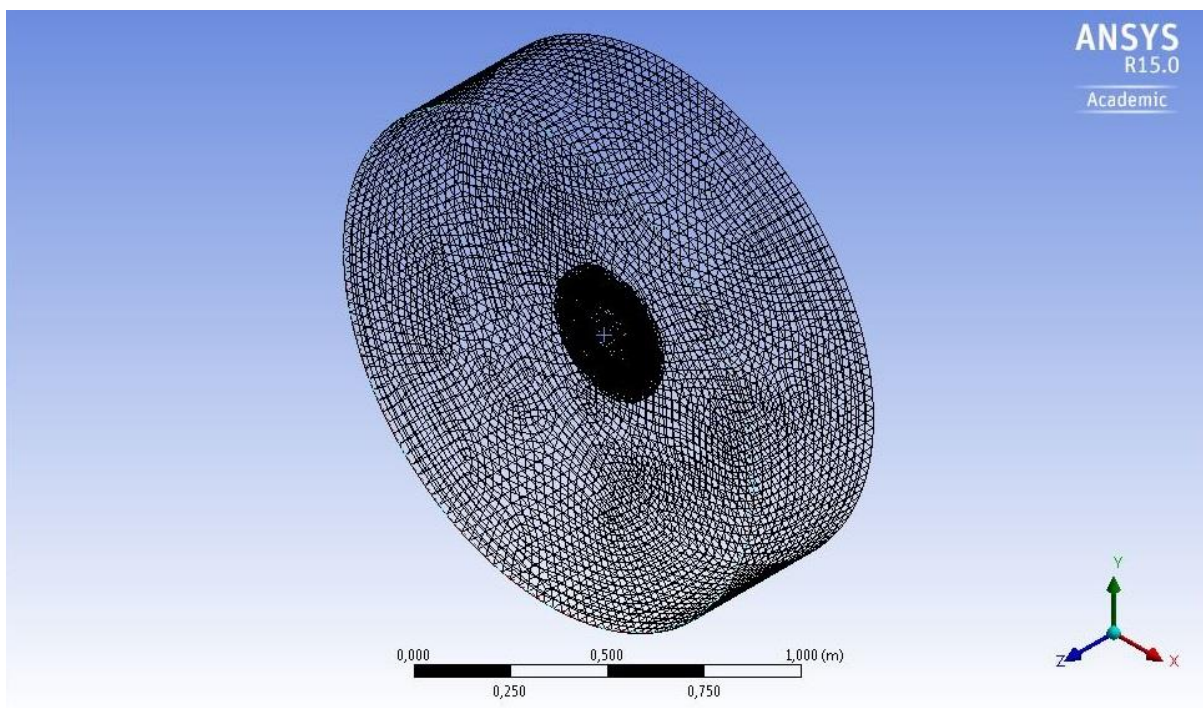
Στο ανωτέρω σχήμα φαίνεται η μεταβατική θερμική ανάλυση που εκτελείται στη γεννήτρια. Ως δεδομένα εισόδου εισάγονται τα υλικά της γεννήτριας και οι ιδιότητές τους, η γεωμετρία της γεννήτριας, τα στοιχεία λειτουργίας και οι οριακές συνθήκες που παρουσιάστηκαν προηγουμένως. Στο ακόλουθο σχήμα φαίνονται τα υλικά που ορίστηκαν για τη γεννήτρια [23]:

Outline of Schematic A2, B2: Engineering Data				
	A	B	C	D
1	Contents of Engineering Data		Source	Description
2	Material			
3	Air	<input type="checkbox"/>		
4	Copper	<input type="checkbox"/>		
5	Epoxy Resin	<input type="checkbox"/>		
6	NdFeB N40	<input type="checkbox"/>		
7	Pure Iron	<input type="checkbox"/>		
8	Structural Steel	<input type="checkbox"/>		Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
9	Vinyl ester	<input type="checkbox"/>		
*	Click here to add a new material			

Σχήμα 4.12: Τα υλικά της προσομοίωσης.

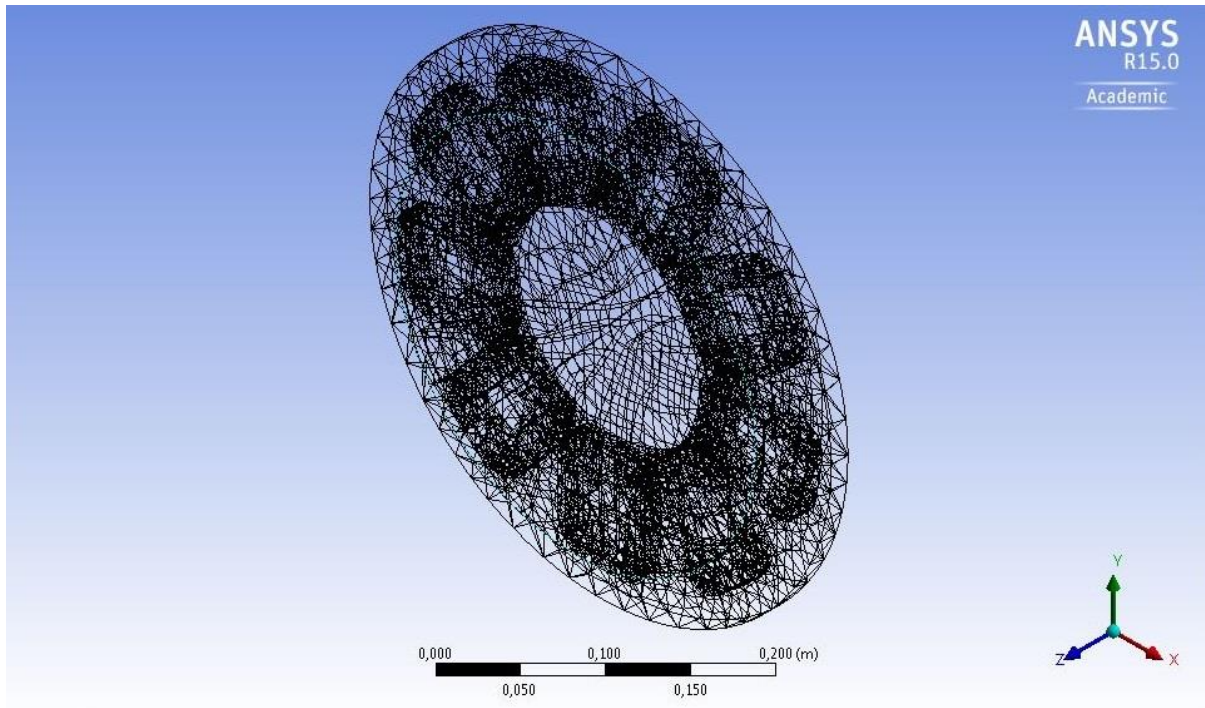
4.5.1 Αποτελέσματα σύγχρονης γεννήτριας AFPM 600 W

Εφόσον καθοριστούν πλήρως τα υλικά της γεννήτριας, οι πηγές θερμότητας και οι οριακές συνθήκες που υπάρχουν στο θερμικό μοντέλο, το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων αναλύει το σχέδιο και δημιουργεί το πλέγμα της γεννήτριας. Στα Σχήματα 4.13, 4.14, 4.15 φαίνεται το παραγόμενο πλέγμα για τη συνολική σχεδίαση και τη γεννήτρια ειδικότερα, καθώς και μία κάτοψη της γεννήτριας:

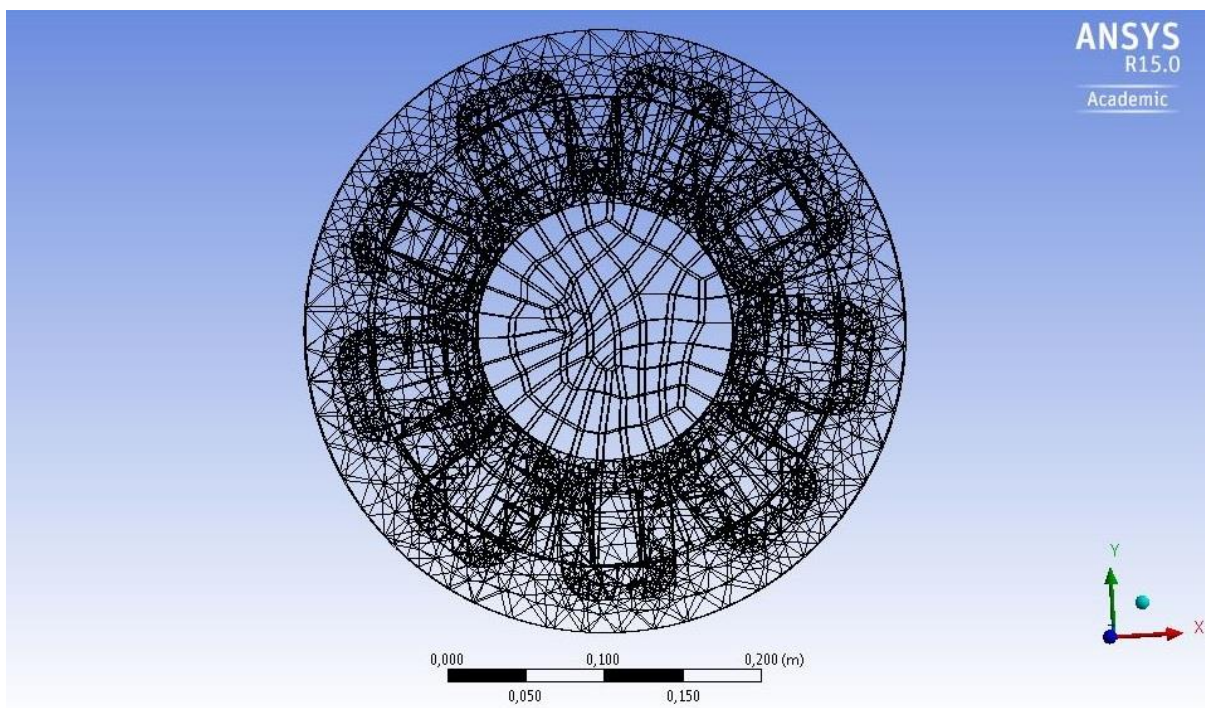


Σχήμα 4.13: Το πλέγμα της συνολικής σχεδίασης για τη γεννήτρια 600 W.

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται η συνολική σχεδίαση του θερμικού προβλήματος, όπου εκτός από τη γεννήτρια στο κέντρο, έχει σχεδιαστεί και ένας κύλινδρος πενταπλάσιων διαστάσεων σε σχέση με τη γεννήτρια, ο οποίος προσομοιώνει τον περιβάλλοντα αέρα και θεωρείται πως στα άκρα του έχει σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος 23 °C. [13]



Σχήμα 4.14: Το πλέγμα της γεννήτριας 600 W.



Σχήμα 4.15: Κάτοψη του πλέγματος της γεννήτριας 600 W.

Το σχέδιο της γεννήτριας και του περιβάλλοντα αέρα αναλύθηκε σε 191430 κόμβους και 50166 πεπερασμένα στοιχεία, στα οποία εφαρμόστηκαν οι μαθηματικές σχέσεις αγωγής και συναγωγής για να προσδιοριστεί το θερμοκρασιακό πεδίο της γεννήτριας. Απαραίτητος περιορισμός για την πραγματοποίηση της ανάλυσης από τον κώδικα είναι να υπάρχουν δύο τουλάχιστον πεπερασμένα στοιχεία σε κάθε κρίσιμη περιοχή του σχεδίου. Στο Σχήμα 4.16 παρουσιάζονται οι ρυθμίσεις του πλέγματος, καθώς και ο αριθμός των κόμβων και των στοιχείων:

Details of "Mesh"	
Smoothing	High
Transition	Fast
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (18,0 °)
<input type="checkbox"/> Min Size	Default (3,1613e-00...
<input type="checkbox"/> Max Face Size	Default (3,1613e-00...
<input type="checkbox"/> Max Size	Default (6,3225e-00...
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,850)
Minimum Edge Length	8,e-003 m
+ Inflation	
- Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
- Patch Independent Options	
Topology Checking	Yes
+ Advanced	
+ Defeaturing	
- Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	191430
<input type="checkbox"/> Elements	50166

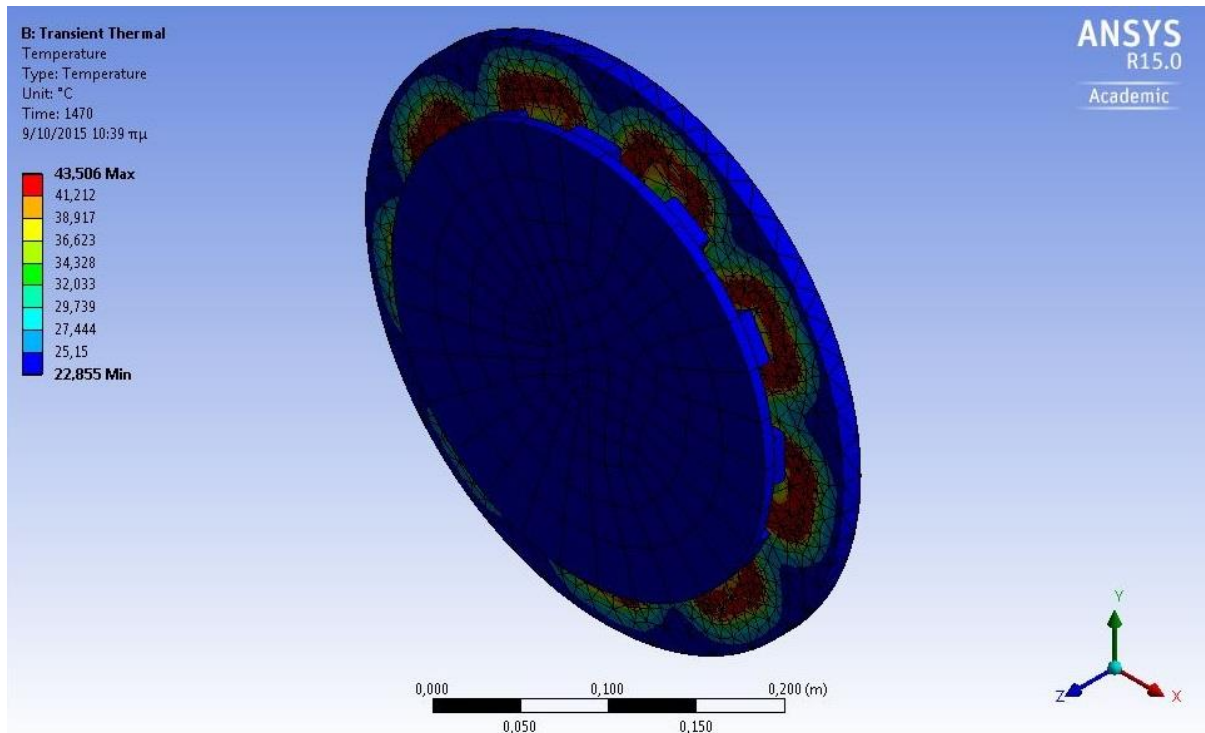
Σχήμα 4.16: Ρυθμίσεις πλέγματος και αριθμός κόμβων και στοιχείων.

Όπως φαίνεται από τα προηγούμενα σχήματα, επιλέχθηκε όσο το δυνατόν μικρότερο πλέγμα, ώστε η ανάλυση να γίνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια, ενώ παράλληλα να ολοκληρώνεται όσο το δυνατόν ταχύτερα.

Για ρεύμα λειτουργίας $I=7.03\text{ A}$

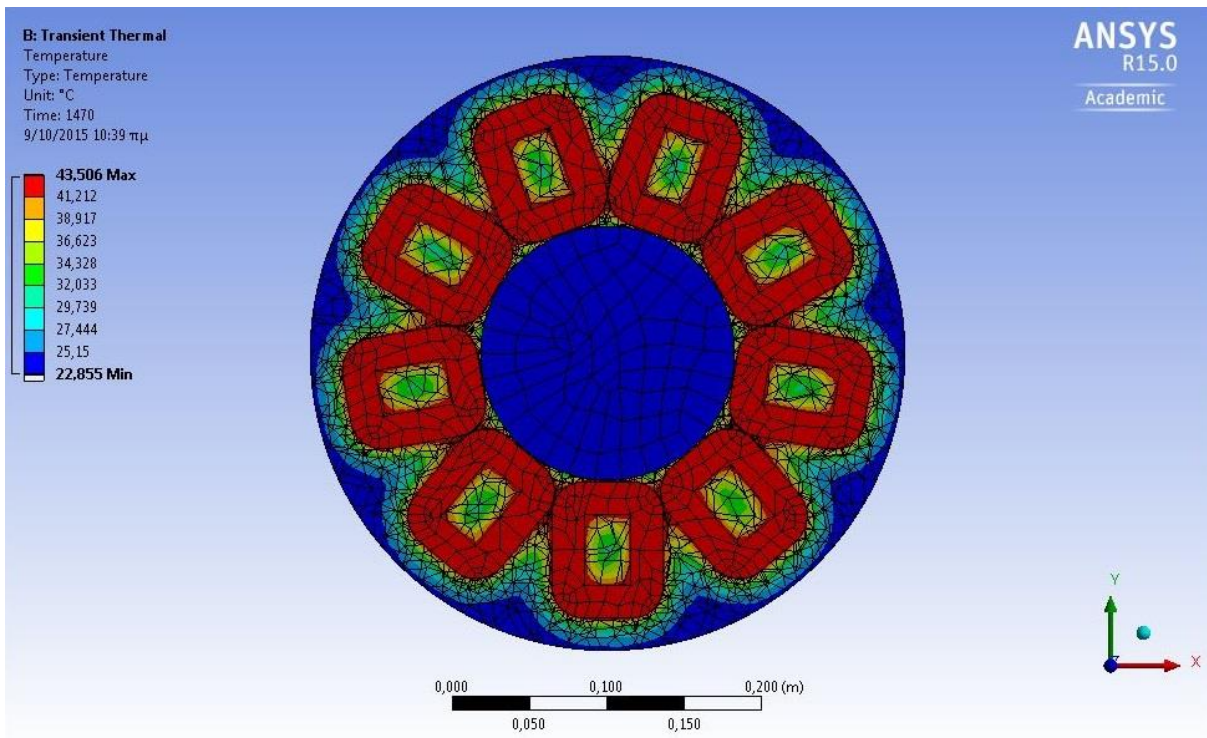
Εισάγονται στον κώδικα όλα τα απαραίτητα στοιχεία και οι οριακές συνθήκες που ορίστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο αυτού του κεφαλαίου και εξάγονται τα αποτελέσματα της θερμικής ανάλυσης. Ο χρόνος εκτέλεσης της ανάλυσης επιλέγεται να είναι στα 24.5 min , ώστε να μπορεί να συγκριθεί το αποτέλεσμα με το πειραματικό που θα παρουσιαστεί στο επόμενο κεφάλαιο, του οποίου ο χρόνος εκτέλεσης ήταν ίδιος. Στο παρακάτω σχήμα

φαίνεται το θερμικό πεδίο της γεννήτριας που προκύπτει από την προσομοίωση, καθώς και το υπόμνημα της θερμοκρασίας για κάθε χρώμα:



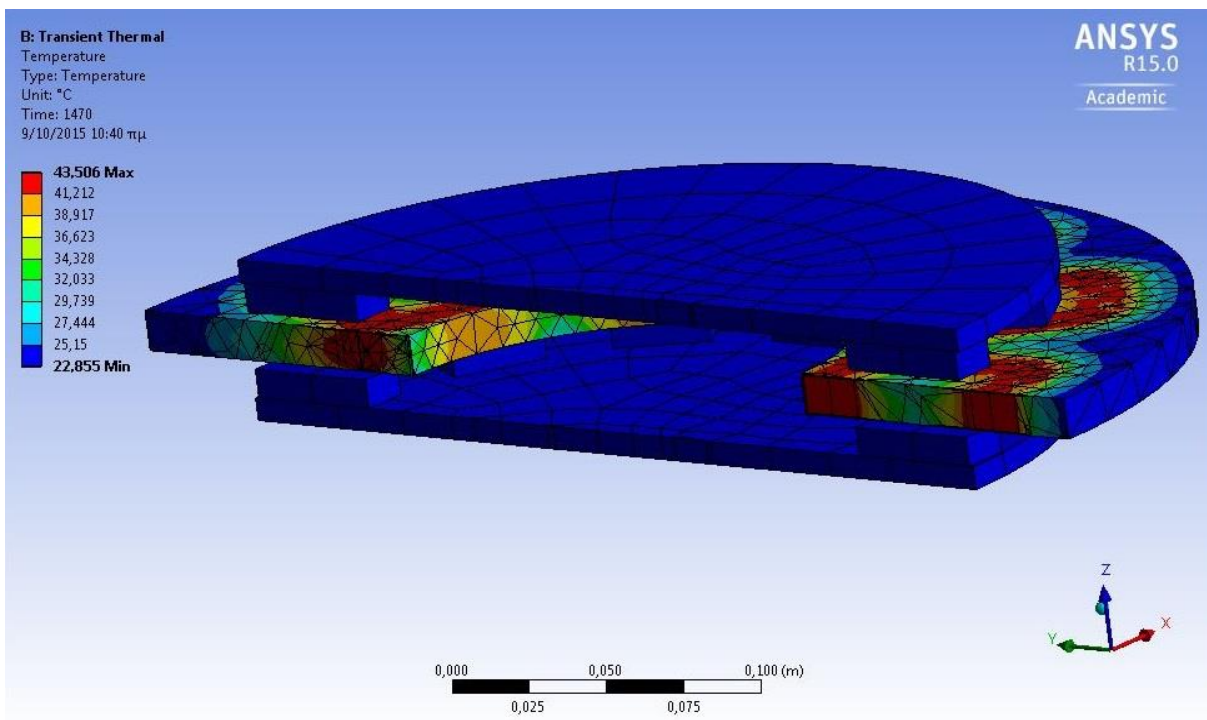
Σχήμα 4.17: Αποτέλεσμα προσομοίωσης γεννήτριας 600 W για ρεύμα 7.03 A.

Μια πρώτη ματιά στο αποτέλεσμα της προσομοίωσης φανερώνει πως η αύξηση της θερμοκρασίας επικεντρώνεται στα τυλίγματα του χαλκού κατά κύριο λόγο, και στην περιβάλλουσα ρητίνη σε δεύτερη φάση. Αντίθετα, ο δρομέας και οι μόνιμοι μαγνήτες διατηρούν την αρχική τους θερμοκρασία. Ασφαλέστερα συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν από την ακόλουθη κάθετη τομή της γεννήτριας:



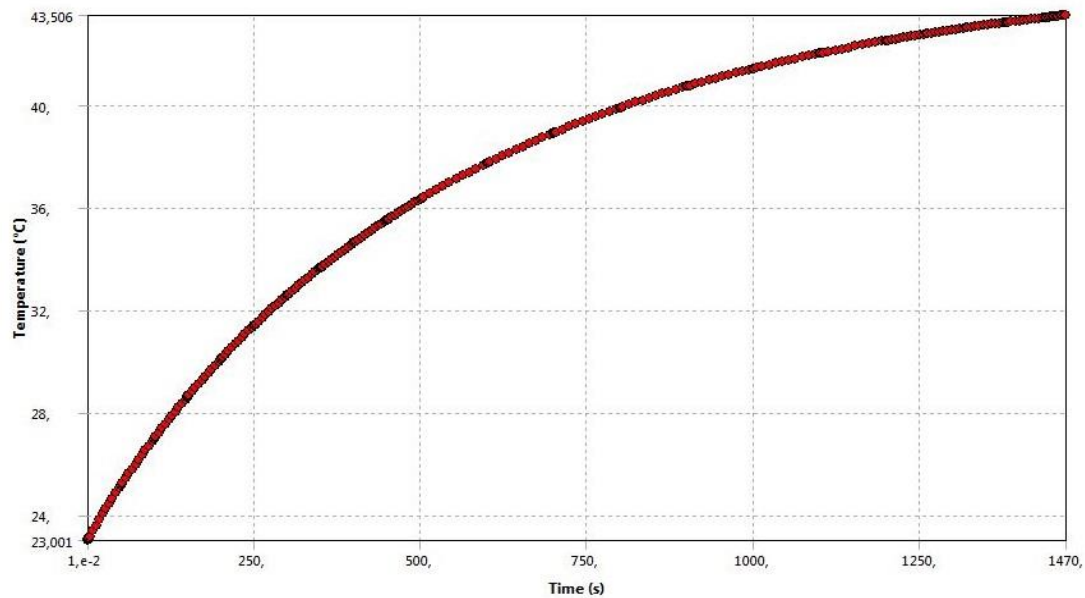
Σχήμα 4.18: Κάθετη τομή αποτελέσματος προσομοίωσης γεννήτριας 600 W για ρεύμα 7.03 A.

Όπως παρατηρούμε, η κατανομή της θερμότητας είναι ομοιόμορφη σε κάθε πηνίο και εξαπλώνεται στη ρητίνη που εφάπτεται με τα τυλίγματα. Συγκεκριμένα, μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας παρουσιάζεται στη ρητίνη που υπάρχει στο εσωτερικό (κενό) του τυλίγματος, γεγονός που φαίνεται και από την αξονοσυμμετρική τομή της γεννήτριας:



Σχήμα 4.19: Αξονοσυμμετρική τομή αποτελέσματος προσομοίωσης γεννήτριας 600 W για ρεύμα 7.03 A.

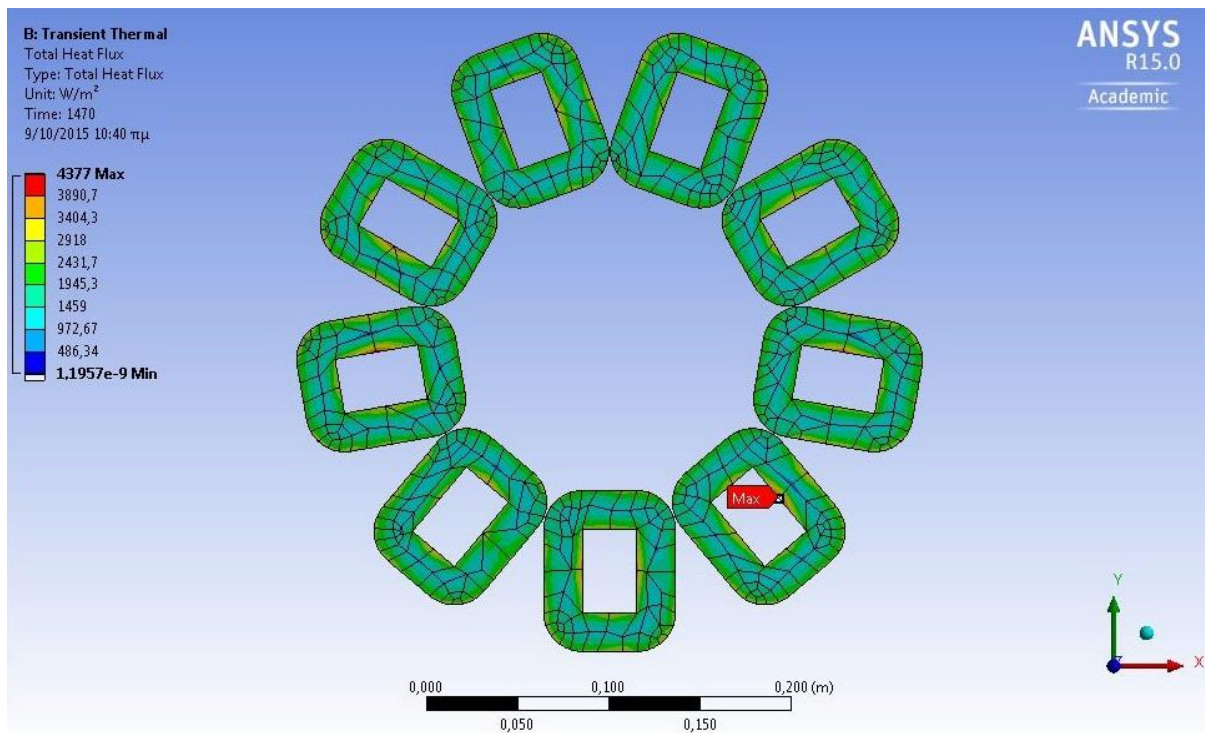
Στο παρακάτω γράφημα φαίνεται η αύξηση της θερμοκρασίας στα τυλίγματα, που είναι και η μέγιστη θερμοκρασία στη γεννήτρια:



Σχήμα 4.20: Καμπύλη θερμοκρασίας των τυλιγμάτων συναρτήσει του χρόνου.

Παρατηρείται πως η θερμοκρασία σταθεροποιείται σιγά σιγά με την πάροδο του χρόνου, καθώς η κλίση της καμπύλης διαρκώς μειώνεται.

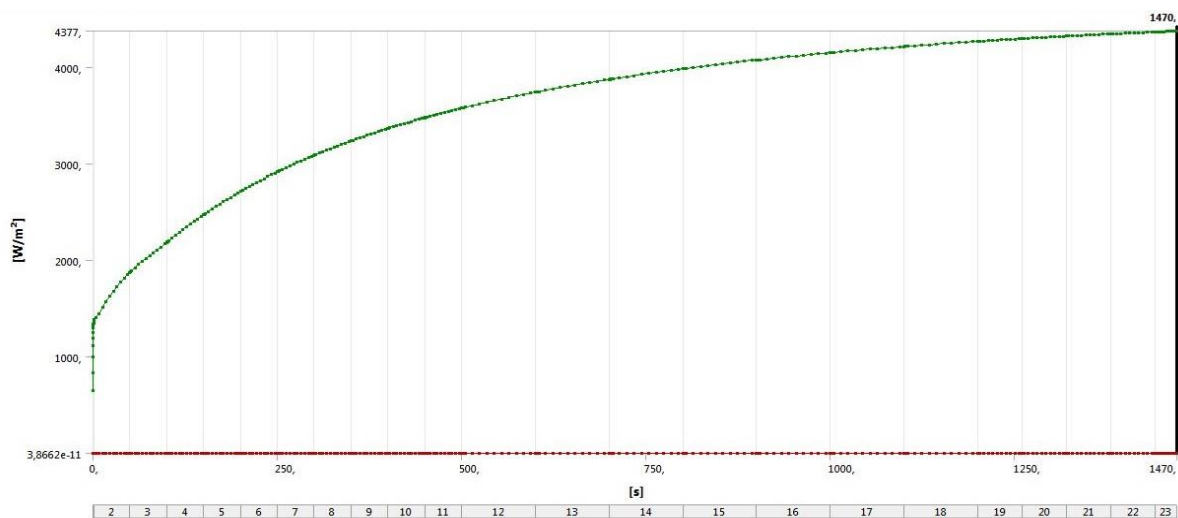
Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται η πυκνότητα της θερμορροής στα τυλίγματα του χαλκού:



Σχήμα 4.21: Πυκνότητα θερμορροής στα τυλίγματα της γεννήτριας 600 W για ρεύμα 7.03 A.

Το συμπέρασμα που προκύπτει από το Σχήμα 4.21 είναι πως η μέγιστη θερμορροή παρατηρείται στο εσωτερικό των τυλιγμάτων, όπου, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, παρατηρείται και η υψηλότερη θερμοκρασία στη ρητίνη. Έτσι, δικαιολογείται η αυξημένη θερμοκρασία στο εσωτερικό των τυλιγμάτων σε σύγκριση με την υπόλοιπη ρητίνη, καθώς προς τα εκεί ρέει περισσότερη θερμότητα.

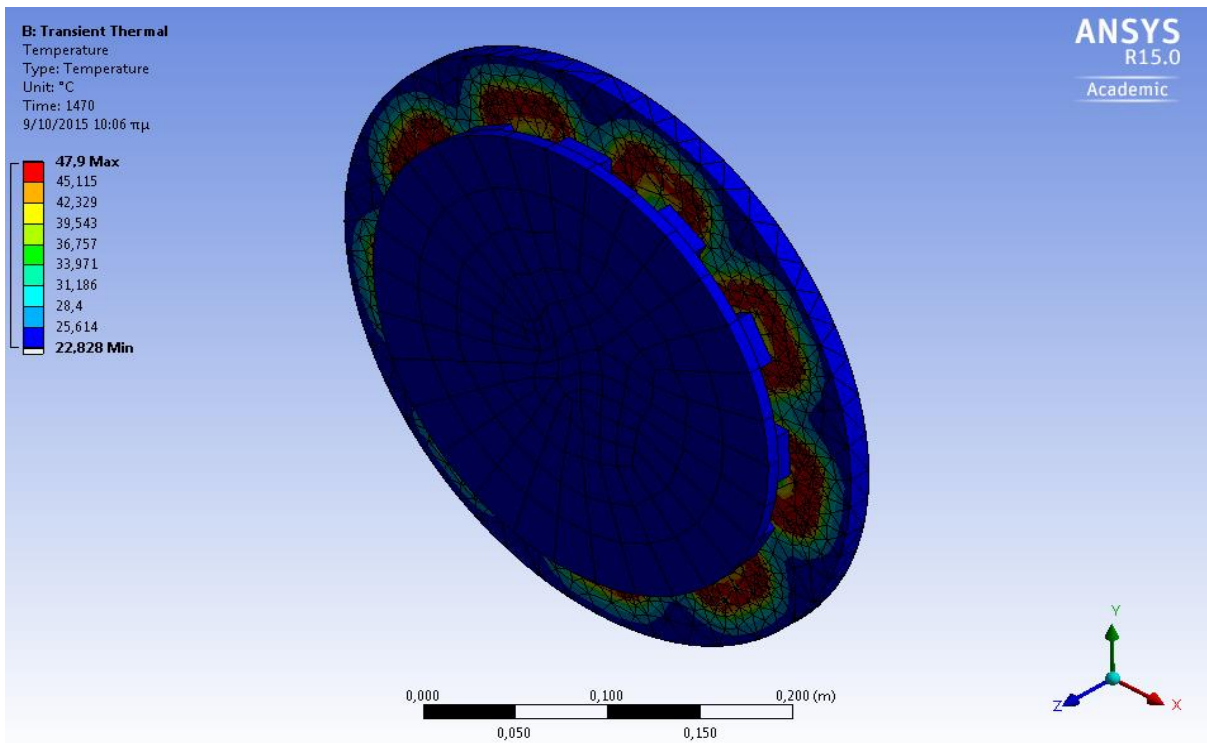
Στο ακόλουθο γράφημα φαίνεται η αύξηση της μέγιστης θερμορροής σε συνάρτηση με το χρόνο, γεγονός που υποδηλώνει ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία στα τυλίγματα του χαλκού τόσο περισσότερη θερμότητα απάγεται στην περιβάλλουσα ρητίνη. Φαίνεται μάλιστα να ακολουθεί την ίδια λογαριθμική συμπεριφορά με τη θερμοκρασία και με την πάροδο του χρόνου να σταθεροποιείται κοντά σε μια τιμή. Στο ίδιο γράφημα παρουσιάζεται και η ελάχιστη θερμορροή σε κάποιο σημείο της γεννήτριας εκτός των τυλιγμάτων, η οποία, όπως αναμενόταν, είναι μηδενική:



Σχήμα 4.22: Καμπύλη μέγιστης και ελάχιστης πυκνότητας θερμορροής στη γεννήτρια 600 W για ρεύμα 7.03 A.

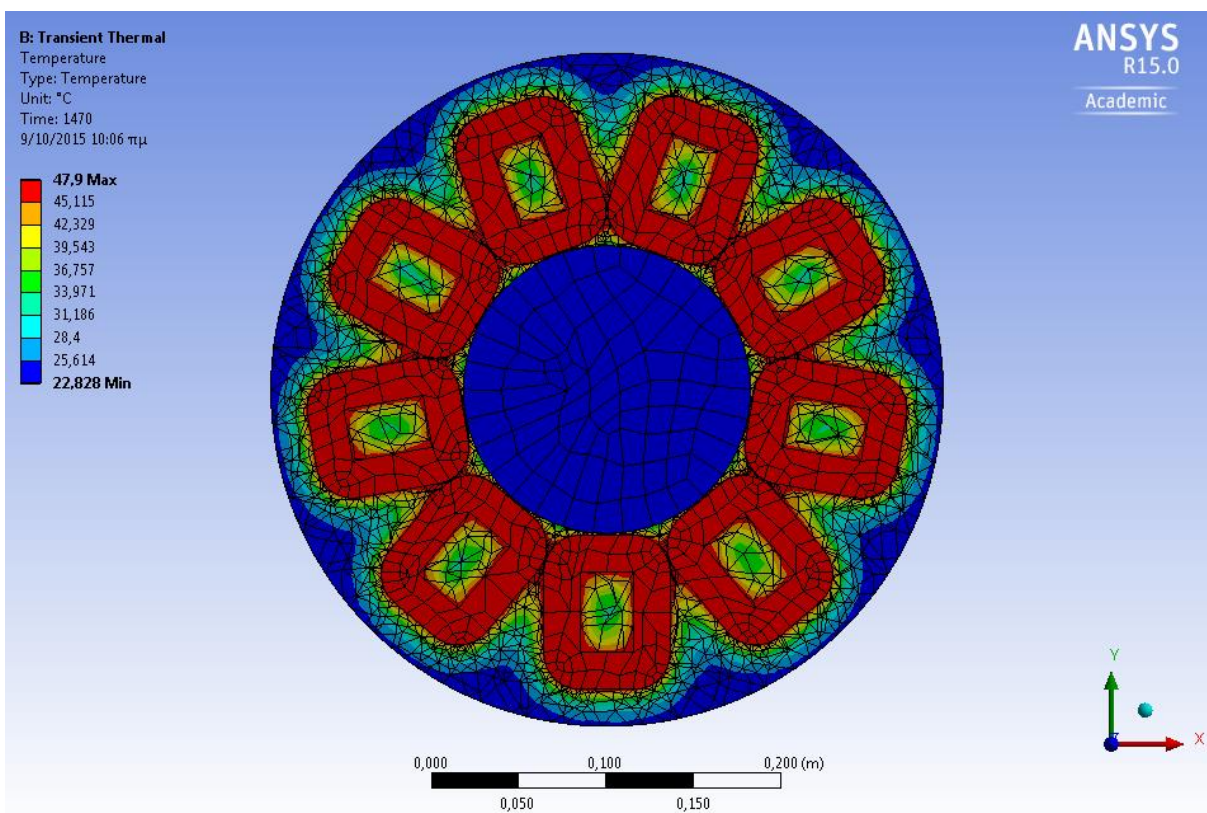
Για ρεύμα λειτουργίας $I=7.72$ A

Όπως και προηγουμένως, εισάγονται στον κώδικα όλα τα δεδομένα εισόδου που προέκυψαν από προηγούμενους υπολογισμούς και εξάγονται τα αποτελέσματα της θερμικής ανάλυσης. Ο χρόνος εκτέλεσης της ανάλυσης επιλέγεται να είναι και πάλι στα 24.5 min για τους ίδιους λόγους. Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται το θερμικό πεδίο της γεννήτριας για το συγκεκριμένο ρεύμα λειτουργίας:



Σχήμα 4.23: Αποτέλεσμα προσομοίωσης γεννήτριας 600 W για ρεύμα 7.72 A.

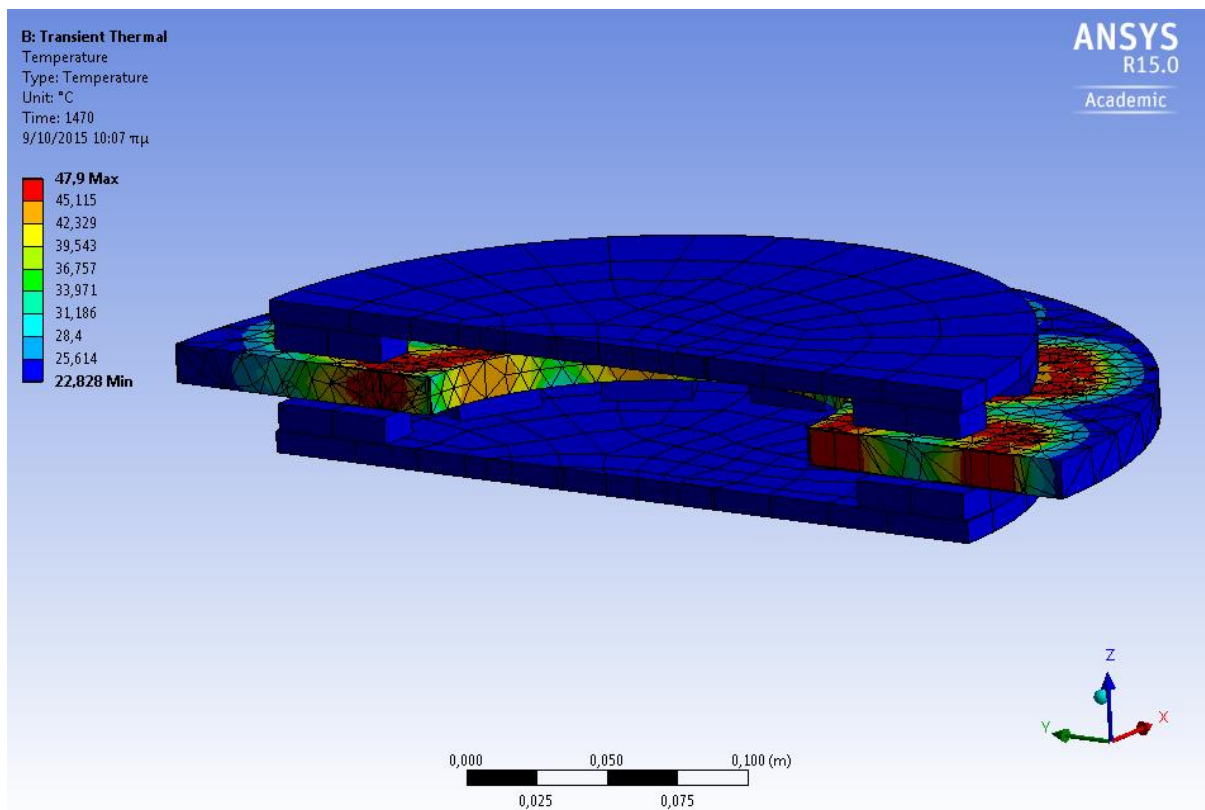
Η κάθετη τομή της γεννήτριας παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.24: Κάθετη τομή αποτελέσματος προσομοίωσης γεννήτριας 600 W για ρεύμα 7.72 A.

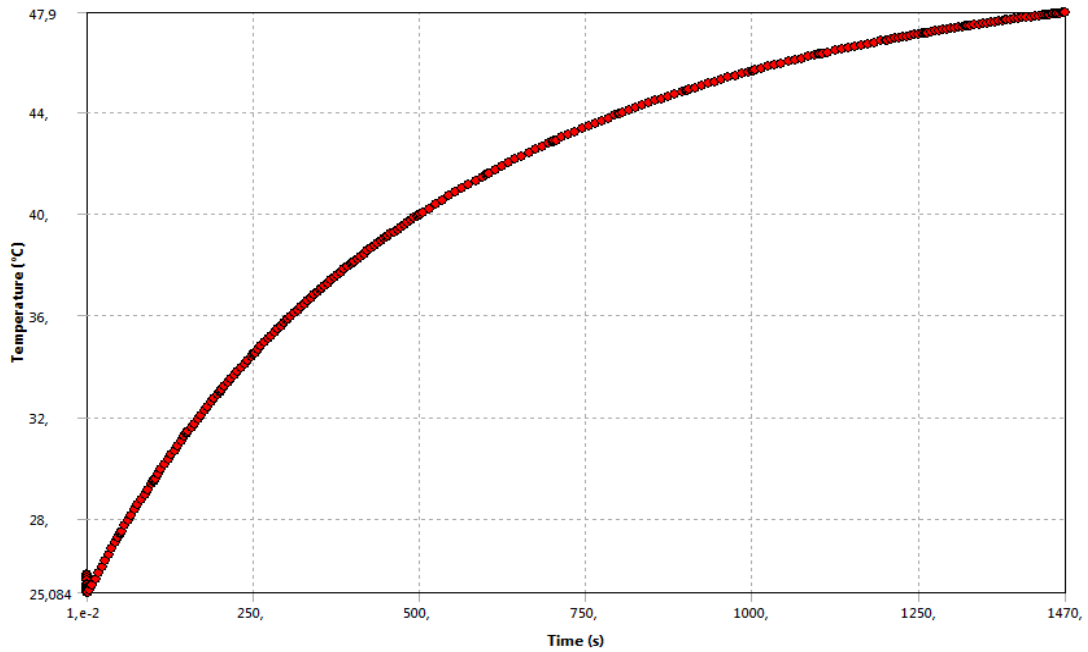
Παρατηρώντας τα δύο προηγούμενα σχήματα βλέπουμε πως, όπως και προηγουμένως, η κυριότερη αύξηση της θερμοκρασίας εμφανίζεται στα τυλίγματα του χαλκού. Μικρότερη αύξηση θερμοκρασίας παρουσιάζεται στη ρητίνη, ενώ δρομείς και μαγνήτες σταθεροποιούνται στη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Ακολουθεί η αξονοσυμμετρική τομή της γεννήτριας, στην οποία εμφανίζεται και πάλι η ίδια συμπεριφορά στη ρητίνη, η οποία ζεσταίνεται περισσότερο στο κενό των τυλιγμάτων, ενώ όσο απομακρύνεται από τον χαλκό τόσο μειώνεται η θερμοκρασία της:



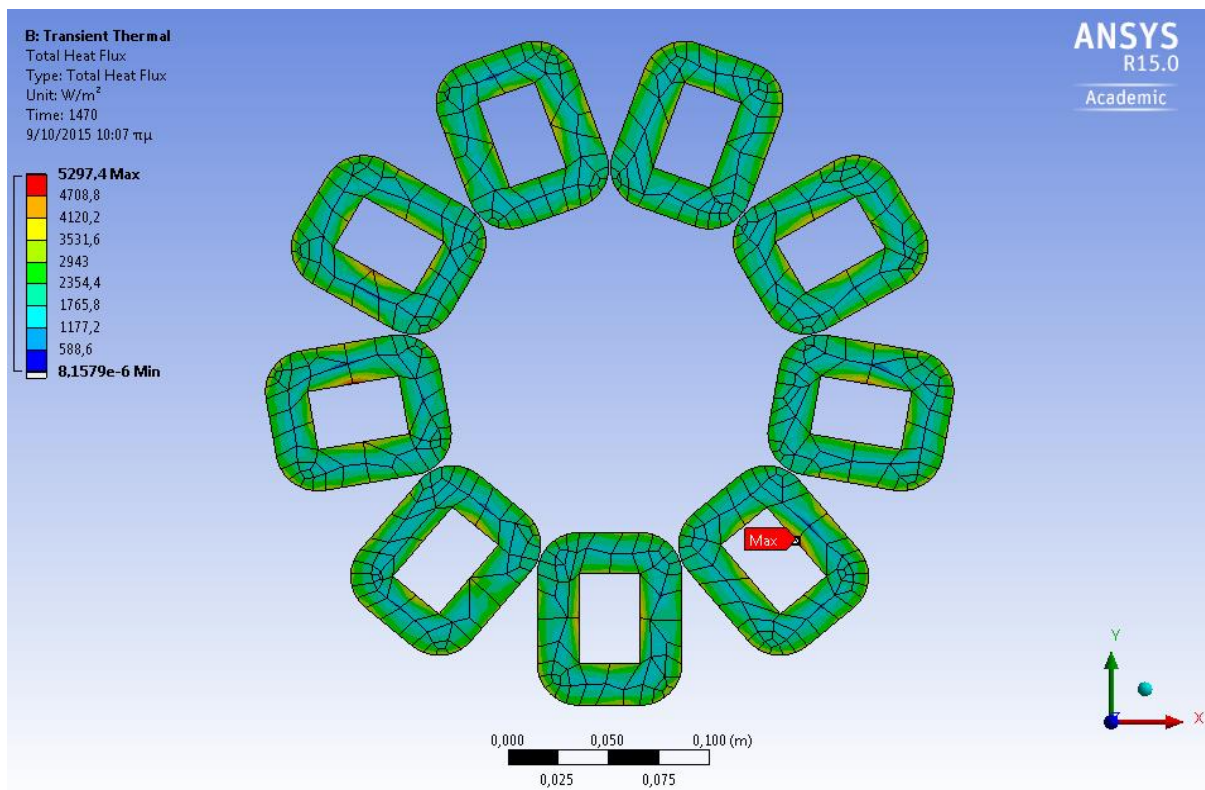
Σχήμα 4.25: Αξονοσυμμετρική τομή αποτελέσματος προσομοίωσης γεννήτριας 600 W για ρεύμα 7.72 A.

Στο ακόλουθο γράφημα παρουσιάζεται η σταθεροποίηση της μέγιστης θερμοκρασίας της γεννήτριας, δηλαδή της θερμοκρασίας των τυλιγμάτων:



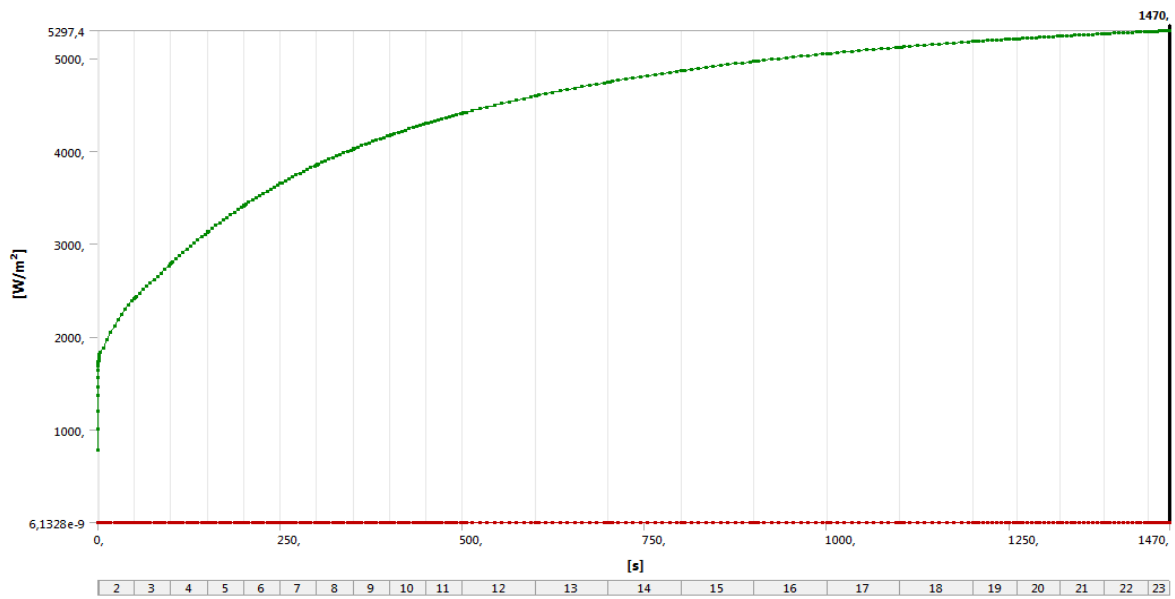
Σχήμα 4.26: Καμπύλη θερμοκρασίας των τυλιγμάτων συναρτήσει του χρόνου.

Η πυκνότητα της θερμορροής στα τυλίγματα του χαλκού παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα, από το οποίο προκύπτει και πάλι η παρατήρηση ότι η μέγιστη θερμορροή εμφανίζεται στην εσωτερική πλευρά των πηνίων:



Σχήμα 4.27: Πυκνότητα θερμορροής στα τυλίγματα της γεννήτριας 600 W για ρεύμα 7.72 A.

Ακολουθεί το γράφημα της μέγιστης και της ελάχιστης πυκνότητας θερμορροής:



Σχήμα 4.28: Καμπύλη μέγιστης και ελάχιστης πυκνότητας θερμορροής στη γεννήτρια 600 W για ρεύμα 7.72 A.

Η πυκνότητα θερμορροής και για αυτό το ρεύμα λειτουργίας ακολουθεί τη συμπεριφορά της μέγιστης θερμοκρασίας. Παράλληλα, η ελάχιστη θερμορροή παραμένει μηδενική.

Για ρεύμα λειτουργίας $I=8.96\text{ A}$

Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζονται οι ρυθμίσεις της συγκεκριμένης ανάλυσης, καθώς και ο συνολικός αριθμός των βημάτων και οι χρόνοι στους οποίους εξετάστηκε το θερμικό πρόβλημα:

Details of "Analysis Settings"	
[-] Step Controls	
Number Of Steps	20,
Current Step Number	20,
Step End Time	1320, s
Auto Time Stepping	Program Controlled
Initial Time Step	0,6 s
Minimum Time Step	6,e-002 s
Maximum Time Step	6, s
Time Integration	On
[-] Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
[+] Radiosity Controls	
[+] Nonlinear Controls	
[+] Output Controls	
[+] Analysis Data Management	
[+] Visibility	

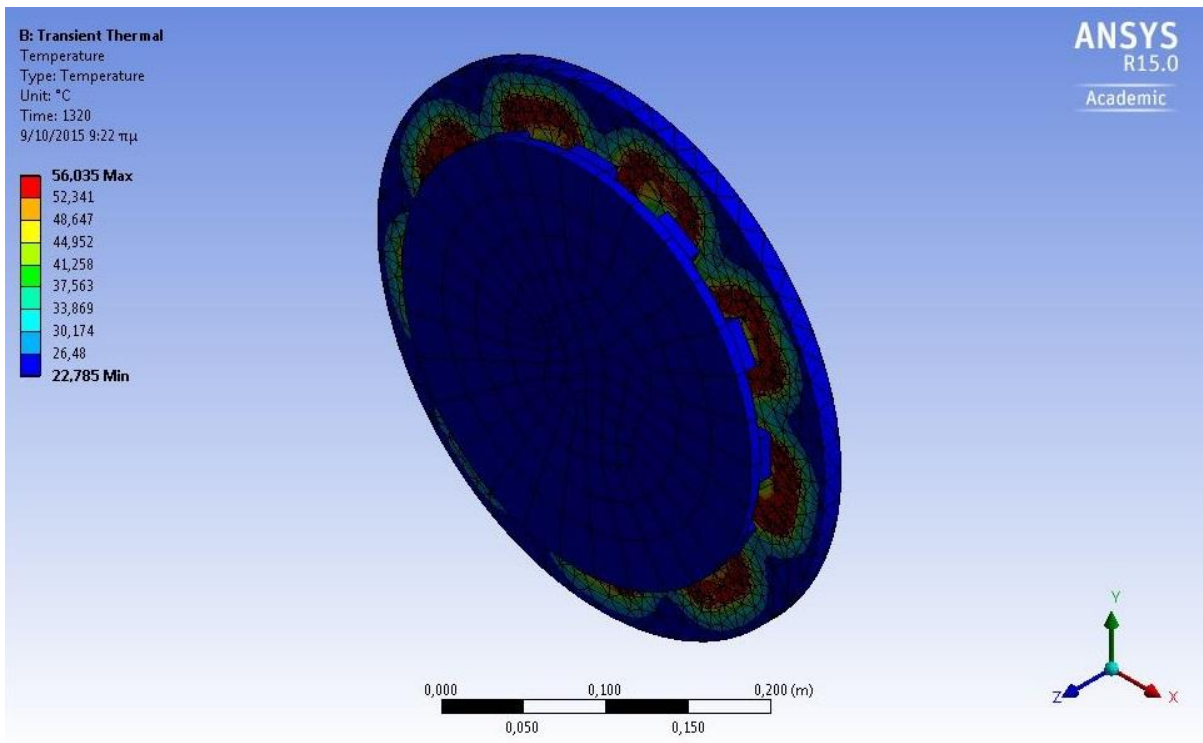
Σχήμα 4.29: Ρυθμίσεις ανάλυσης.

	Steps	End Time [s]
1	1	1,
2	2	50,
3	3	100,
4	4	150,
5	5	200,
6	6	250,
7	7	300,
8	8	350,
9	9	400,
10	10	450,
11	11	500,
12	12	600,
13	13	700,
14	14	800,
15	15	900,
16	16	1000,
17	17	1100,
18	18	1200,
19	19	1260,
20	20	1320,
*		

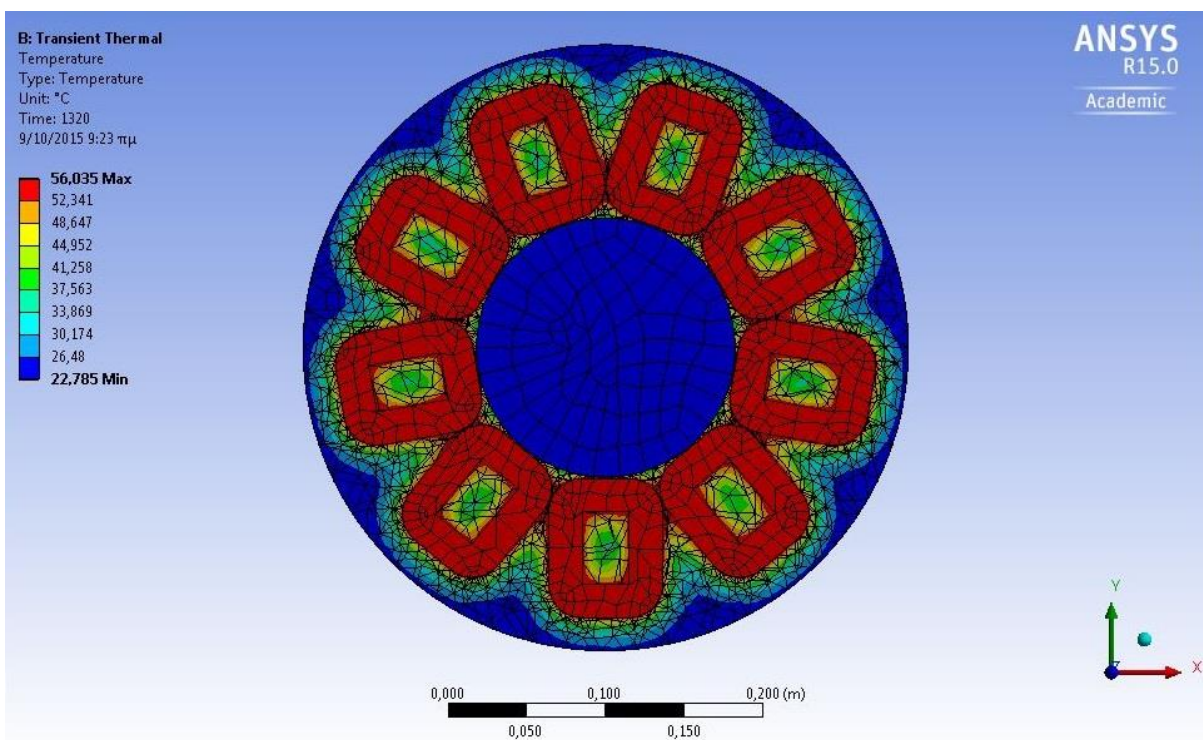
Σχήμα 4.30: Βήματα ανάλυσης.

Όπως είναι εμφανές, στην αρχή της ανάλυσης επιλέγονται μικρότερα διαστήματα μεταξύ των βημάτων, ώστε να υπάρχουν περισσότερες πληροφορίες για τα πρώτα στάδια της μεταβατικής ανάλυσης, όπου η θερμοκρασία ανεβαίνει με μεγαλύτερη κλίση. Στο τέλος πάλι της ανάλυσης, όπου μας ενδιαφέρει να δούμε τη σταθεροποίηση της θερμοκρασίας, επιλέγονται ξανά μικρότερα διαστήματα. Ο συνολικός χρόνος της προσομοίωσης που επιλέγεται ($1320\text{s} = 22\text{ min}$) είναι τέτοιος, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης και πειράματος που ακολουθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

Το θερμικό πεδίο της γεννήτριας για ρεύμα λειτουργίας $I = 8.96\text{A}$ παρουσιάζεται στην ακόλουθη όψη της γεννήτριας, καθώς και στην κάθετη στον άξονα τομή της:



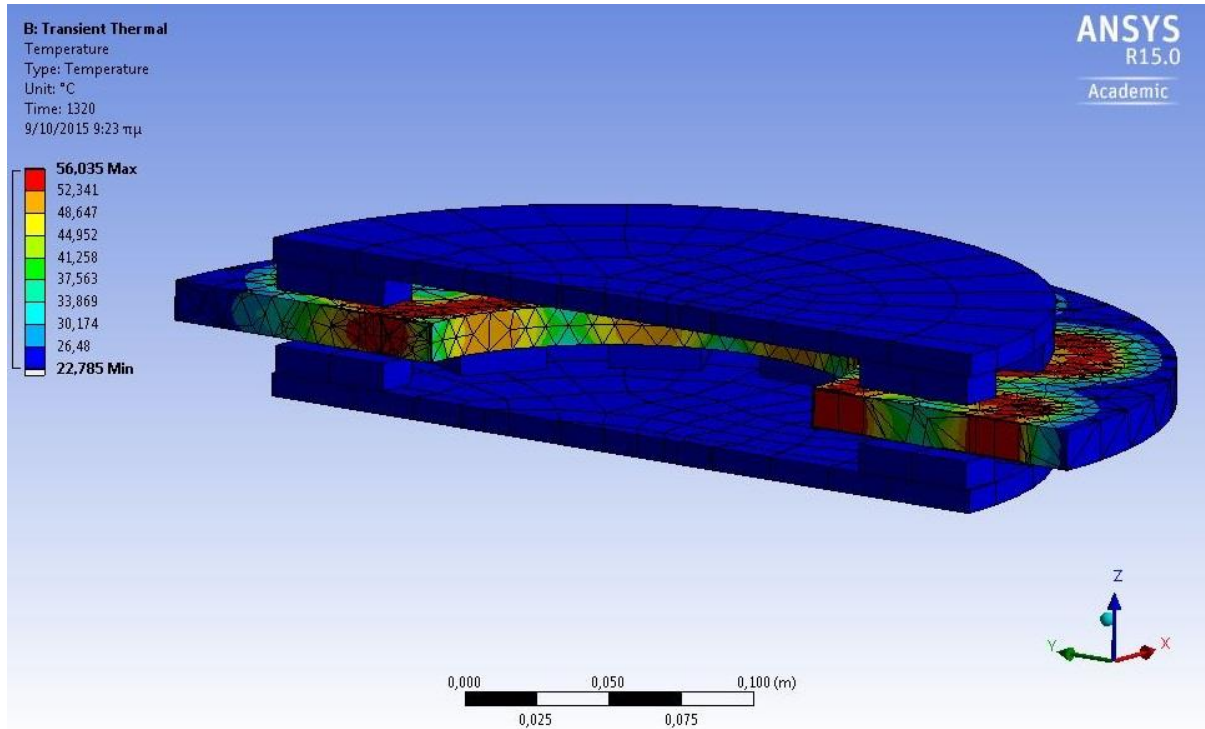
Σχήμα 4.31: Αποτέλεσμα προσομοίωσης γεννήτριας 600 W για ρεύμα 8.96 A.



Σχήμα 4.32: Κάθετη τομή αποτελέσματος προσομοίωσης γεννήτριας 600 W για ρεύμα 8.96 A.

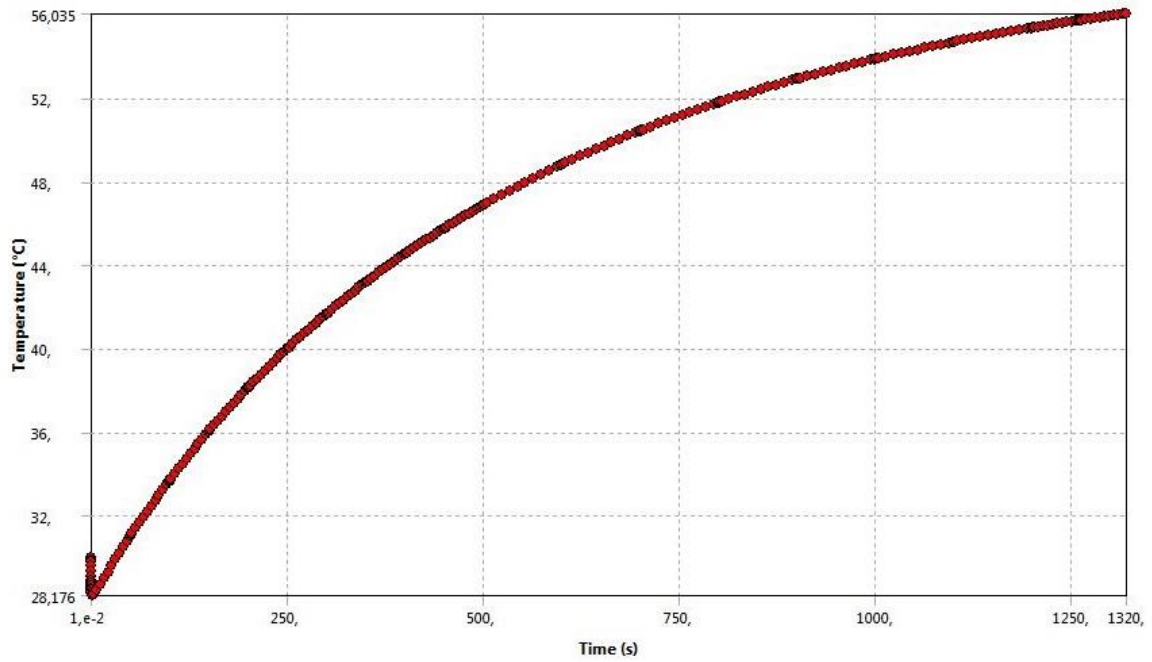
Στα δύο αυτά σχήματα παρατηρείται η ίδια θερμική συμπεριφορά της γεννήτριας με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις που εξετάστηκαν.

Μια ακόμη όψη της γεννήτριας, αυτή τη φορά η αξονοσυμμετρική τομή της, μας δείχνει ότι ο χαλκός είναι η κύρια εστία θερμότητας:



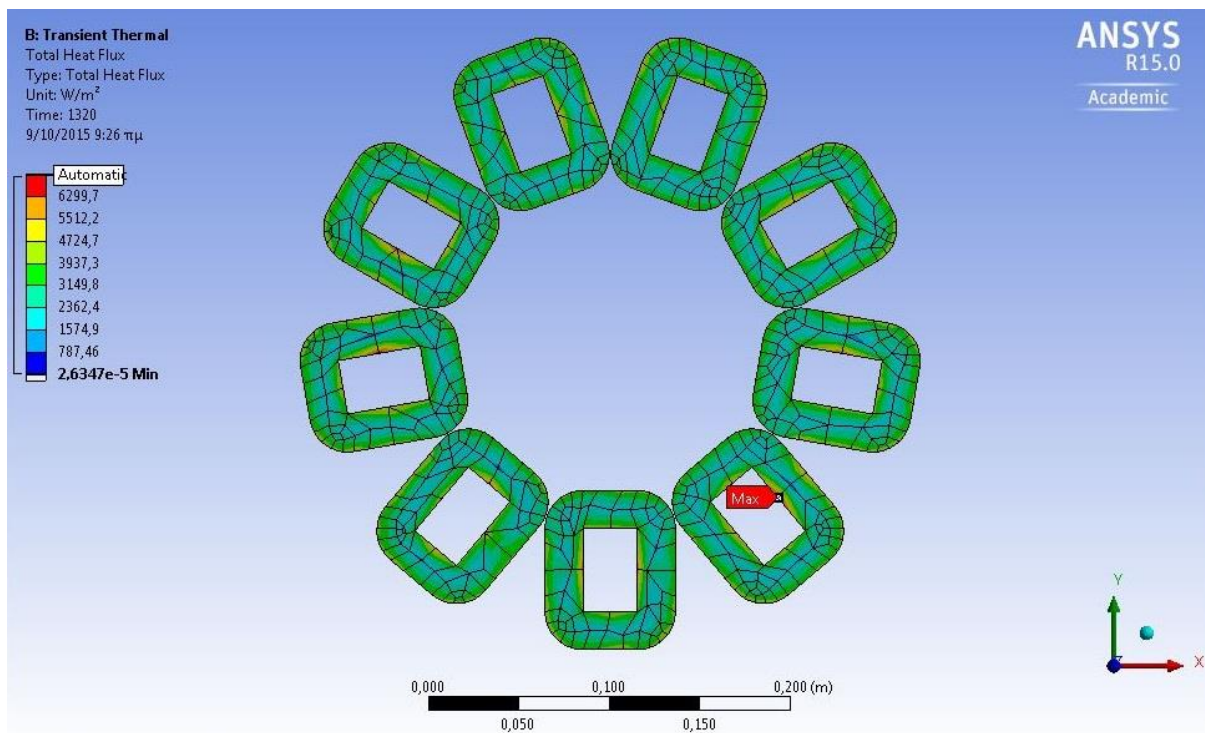
Σχήμα 4.33: Αξονοσυμμετρική τομή αποτελέσματος προσομοίωσης γεννήτριας 600 W για ρεύμα 8.96 A.

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, η μέγιστη θερμοκρασία της γεννήτριας αυξάνεται με γρήγορους ρυθμούς στα πρώτα λεπτά της λειτουργίας της και σταδιακά η κλίση αυτή μειώνεται, μέχρι να αρχίσει να σταθεροποιείται η θερμοκρασία σε μία τελική τιμή. Αυτή η συμπεριφορά είναι εμφανής στο ακόλουθο γράφημα:



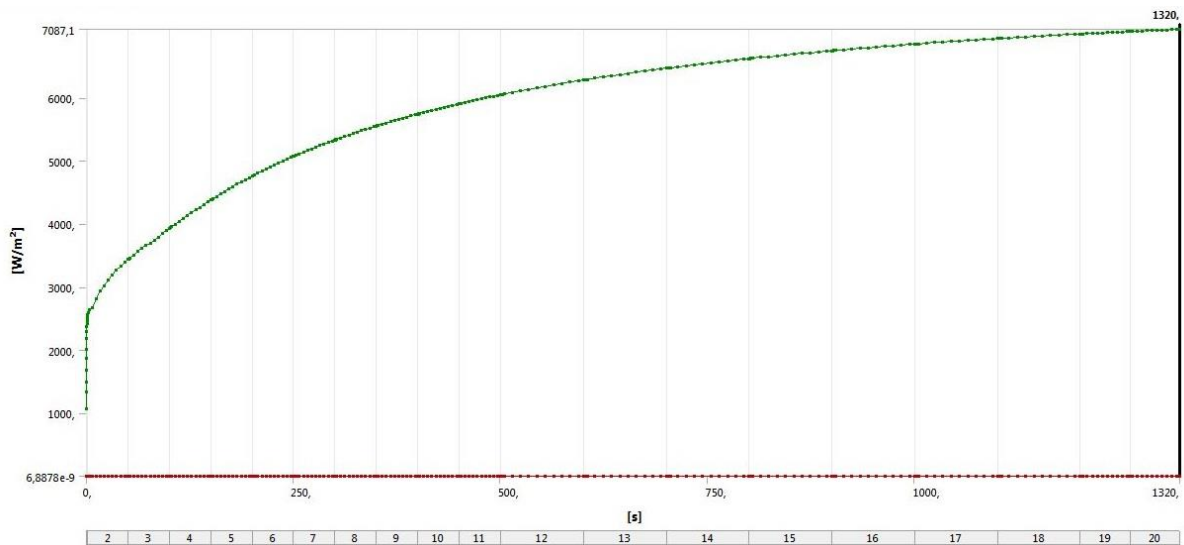
Σχήμα 4.34: Καμπύλη θερμοκρασίας των τυλιγμάτων συναρτήσει του χρόνου.

Παρακάτω παρατίθεται η πυκνότητα της θερμορροής στα τυλίγματα του χαλκού, καθώς και το σημείο όπου εμφανίζεται η μέγιστη θερμορροή:



Σχήμα 4.35: Πυκνότητα θερμορροής στα τυλίγματα της γεννήτριας 600 W για ρεύμα 8.96 A.

Στο ακόλουθο γράφημα φαίνεται η μέγιστη πυκνότητα θερμορροής στα πηνία και η μηδενική πυκνότητα θερμορροής οπουδήποτε αλλού στη γεννήτρια:

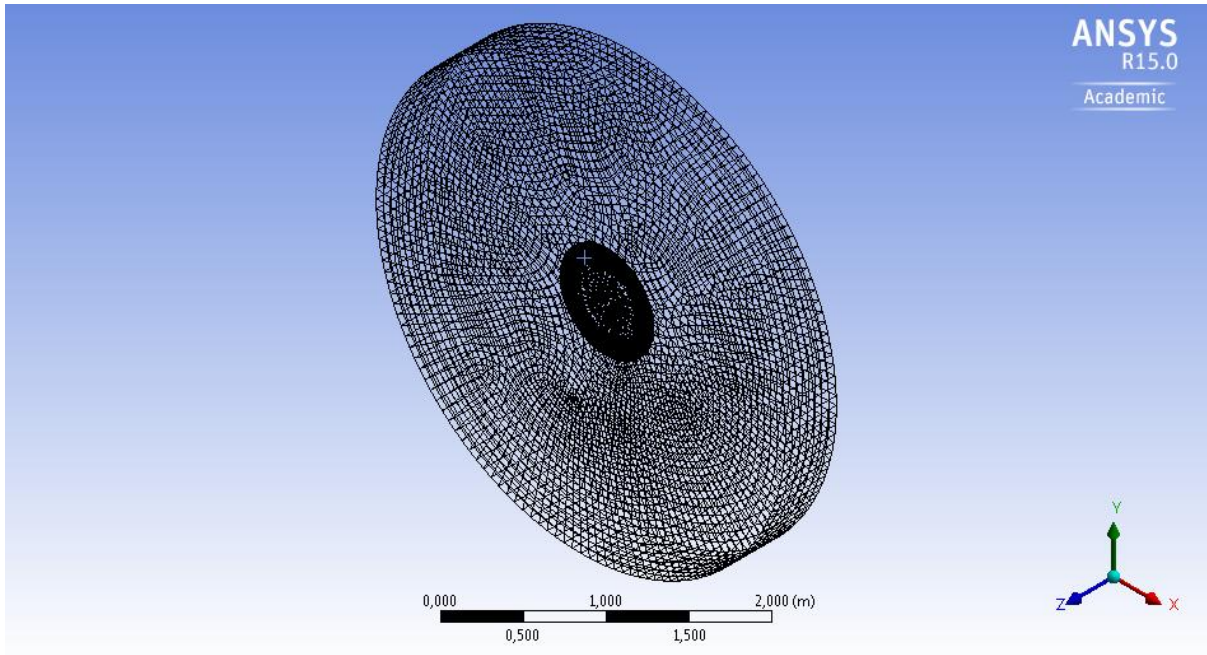


Σχήμα 4.36: Καμπύλη μέγιστης και ελάχιστης πυκνότητας θερμορροής στη γεννήτρια 600 W για ρεύμα 8.96 A.

Συγκρίνοντας τις τρεις διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας για την ίδια γεννήτρια καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως αύξηση του ρεύματος λειτουργίας συνεπάγεται αύξηση της θερμοκρασίας στα τυλίγματα του χαλκού και στην περιβάλλουσα ρητίνη. Αντίστοιχο συμπέρασμα προκύπτει και για την πυκνότητα θερμορροής, η οποία αυξάνεται όσο αυξάνεται και το ρεύμα. Η συμπεριφορά αυτή είναι αναμενόμενη και οφείλεται στις απώλειες του χαλκού, οι οποίες είναι ανάλογες του τετραγώνου του ρεύματος.

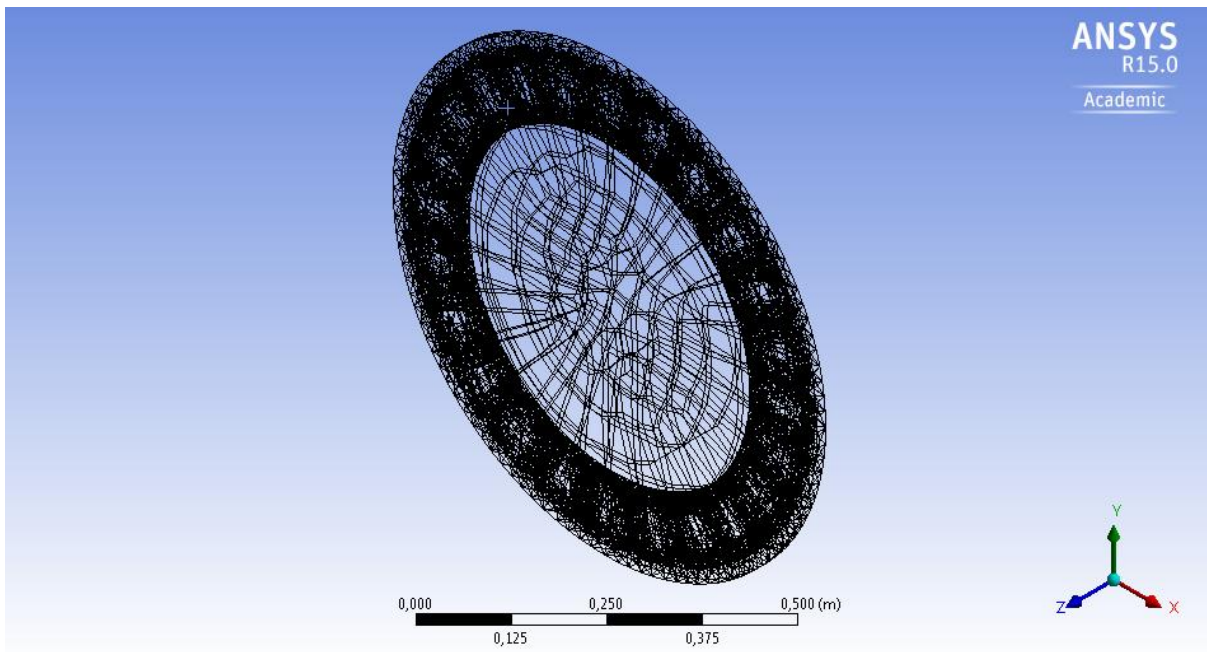
4.5.2 Αποτελέσματα σύγχρονης γεννήτριας AFPM 5 kW

Εισάγονται και πάλι ως δεδομένα εισόδου στο πρόγραμμα τα στοιχεία λειτουργίας και οι οριακές συνθήκες που υπολογίστηκαν σε προηγούμενη παράγραφο του κεφαλαίου, αναλύεται η σχεδίαση της νέας γεννήτριας και παράγεται το πλέγμα. Παρακάτω παρουσιάζεται το παραγόμενο πλέγμα για τη συνολική σχεδίαση και τη γεννήτρια ειδικότερα, καθώς και μία κάτοψη της γεννήτριας:

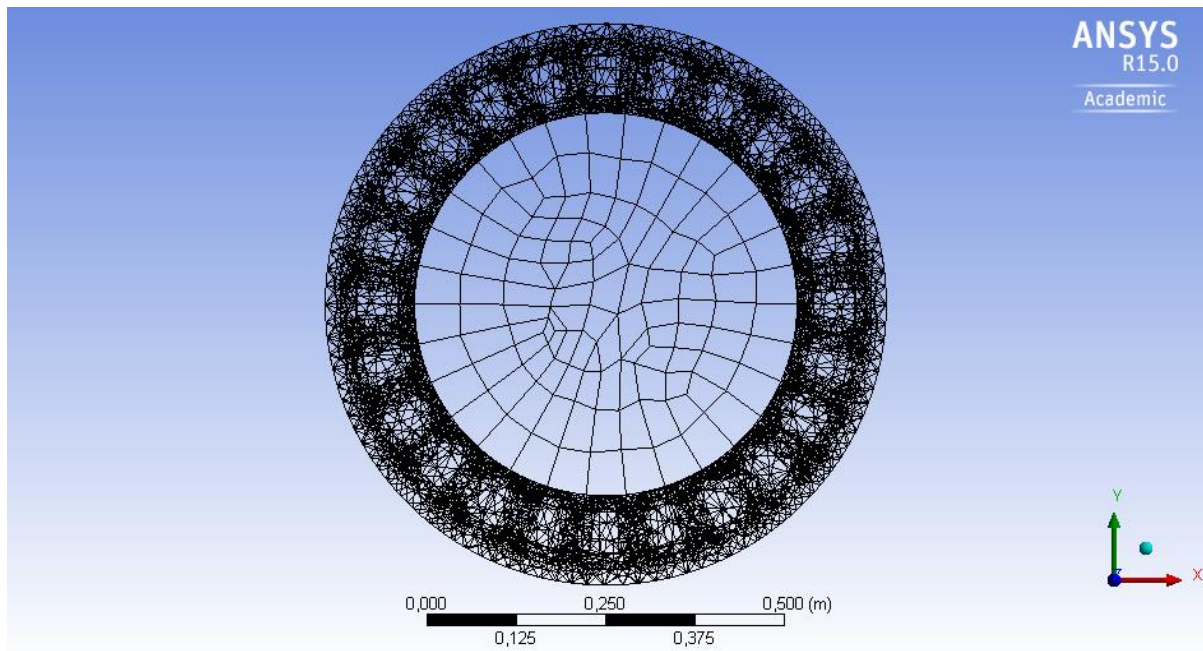


Σχήμα 4.37: Το πλέγμα της συνολικής σχεδίασης για τη γεννήτρια 5 kW.

Στα άκρα του κυλίνδρου πενταπλάσιας ακτίνας από τη γεννήτρια ορίζεται και πάλι σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος ίση με 23 °C.



Σχήμα 4.38: Το πλέγμα της γεννήτριας 5 kW.



Σχήμα 4.39: Κάτοψη του πλέγματος της γεννήτριας 5 kW.

Το σχέδιο της γεννήτριας και του περιβάλλοντα αέρα αναλύεται σε 170543 κόμβους και 53301 πεπερασμένα στοιχεία, στα οποία εφαρμόζονται οι μαθηματικές σχέσεις αγωγής και συναγωγής για τον προσδιορισμό του θερμοκρασιακού πεδίου της γεννήτριας. Η επιλογή των ρυθμίσεων του πλέγματος γίνεται πάντα με στόχο την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια της ανάλυσης, λαμβάνοντας όμως πάντα υπόψη και την πολυπλοκότητα του προβλήματος και την επακόλουθη ταχύτητα εκτέλεσης της ανάλυσης. Στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζονται οι ρυθμίσεις του πλέγματος, καθώς και ο αριθμός των κόμβων και των στοιχείων:

Details of "Mesh"	
Smoothing	High
Transition	Fast
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (18,0 °)
<input type="checkbox"/> Min Size	Default (7,2305e-004 m)
<input type="checkbox"/> Max Face Size	Default (7,2305e-002 m)
<input type="checkbox"/> Max Size	Default (0,144610 m)
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,850)
Minimum Edge Length	1,e-002 m
+ Inflation	
- Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
- Patch Independent Options	
Topology Checking	Yes
+ Advanced	
+ Defeaturing	
- Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	170543
<input type="checkbox"/> Elements	53301

Σχήμα 4.40: Ρυθμίσεις πλέγματος και αριθμός κόμβων και στοιχείων.

Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζονται οι ρυθμίσεις της συγκεκριμένης ανάλυσης, καθώς και ο συνολικός αριθμός των βημάτων και οι χρόνοι στους οποίους εξετάστηκε το θερμικό πρόβλημα. Επιλέγεται χρόνος εκτέλεσης της προσομοίωσης ίσος με $1440\text{ s} = 24\text{ min}$, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση της προσομοίωσης με τις πειραματικές μετρήσεις που θα παρουσιαστούν στο Κεφάλαιο 5.

Details of "Analysis Settings"	
[-] Step Controls	
Number Of Steps	25,
Current Step Number	25,
Step End Time	1440, s
Auto Time Stepping	Program Controlled
Initial Time Step	0,4 s
Minimum Time Step	4, e-002 s
Maximum Time Step	4, s
Time Integration	On
[-] Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
[+] Radiosity Controls	
[+] Nonlinear Controls	
[+] Output Controls	
[+] Analysis Data Management	
[+] Visibility	

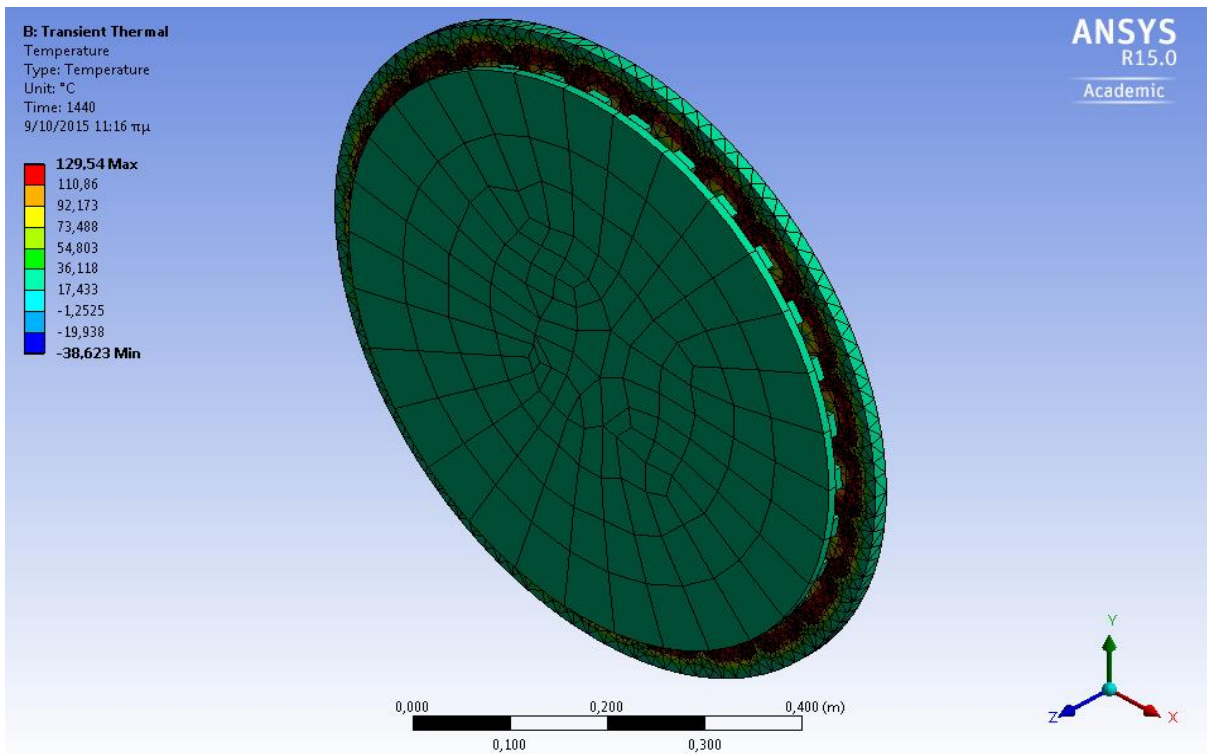
Σχήμα 4.41: Ρυθμίσεις ανάλυσης.

	Steps	End Time [s]
1	1	1,
2	2	50,
3	3	100,
4	4	150,
5	5	200,
6	6	250,
7	7	300,
8	8	350,
9	9	400,
10	10	450,
11	11	500,
12	12	550,
13	13	600,
14	14	700,
15	15	800,
16	16	900,
17	17	1000,
18	18	1100,
19	19	1200,
20	20	1240,
21	21	1280,
22	22	1320,
23	23	1360,
24	24	1400,
25	25	1440,
*		

Σχήμα 4.42: Βήματα ανάλυσης.

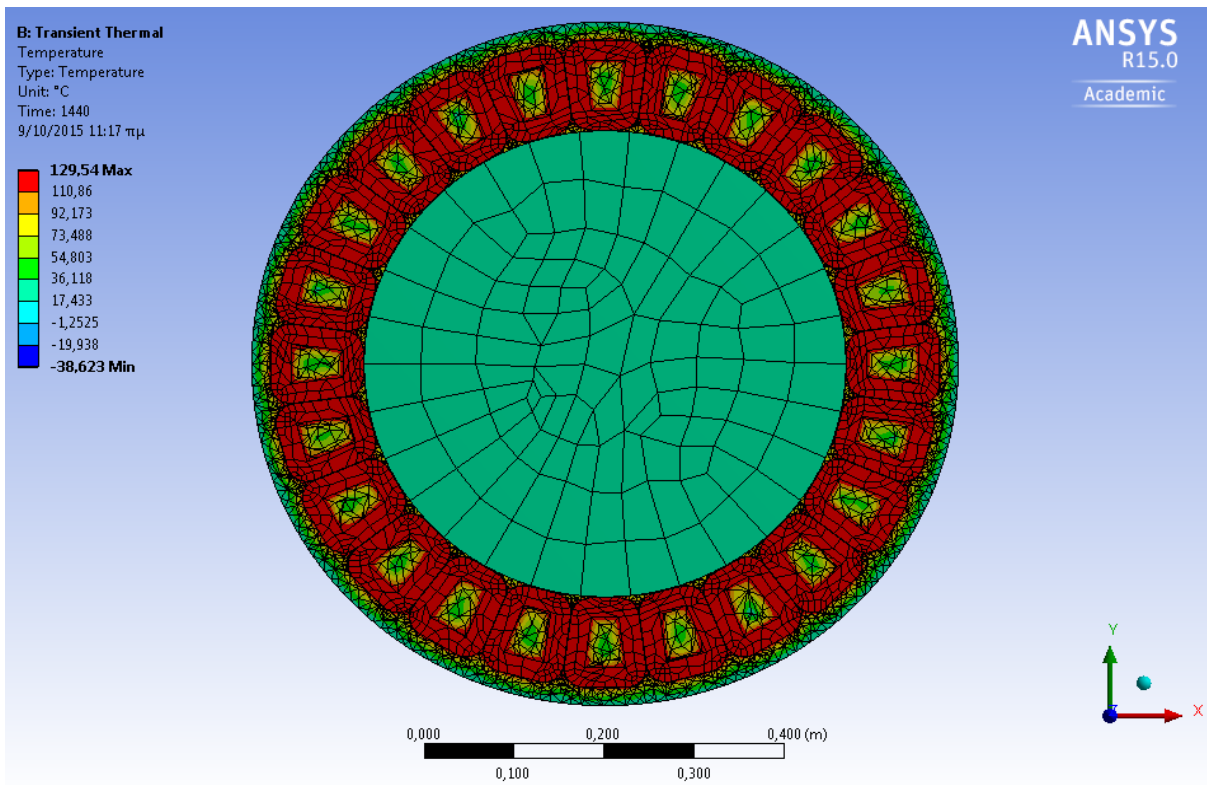
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.42 το ενδιαφέρον μας εστιάζεται στα πρώτα λεπτά λειτουργίας της γεννήτριας, καθώς και στα τελευταία λεπτά της ανάλυσης, όπου η θερμοκρασία αυξάνεται ραγδαία και έπειτα σταθεροποιείται αντίστοιχα.

Η συγκεκριμένη γεννήτρια των 5 kW θα εξεταστεί για ρεύμα λειτουργίας $I = 40.84\text{ A}$. Θα εισαχθούν στον κώδικα ως δεδομένα όλα αυτά τα στοιχεία και οι οριακές συνθήκες που υπολογίστηκαν σε προηγούμενη παράγραφο αυτού του κεφαλαίου και θα προκύψουν τα αποτελέσματα της θερμικής ανάλυσης. Στο Σχήμα 4.43 φαίνεται το θερμικό πεδίο της γεννήτριας που προκύπτει από την προσομοίωση μαζί με το υπόμνημα της θερμοκρασίας για κάθε χρώμα:



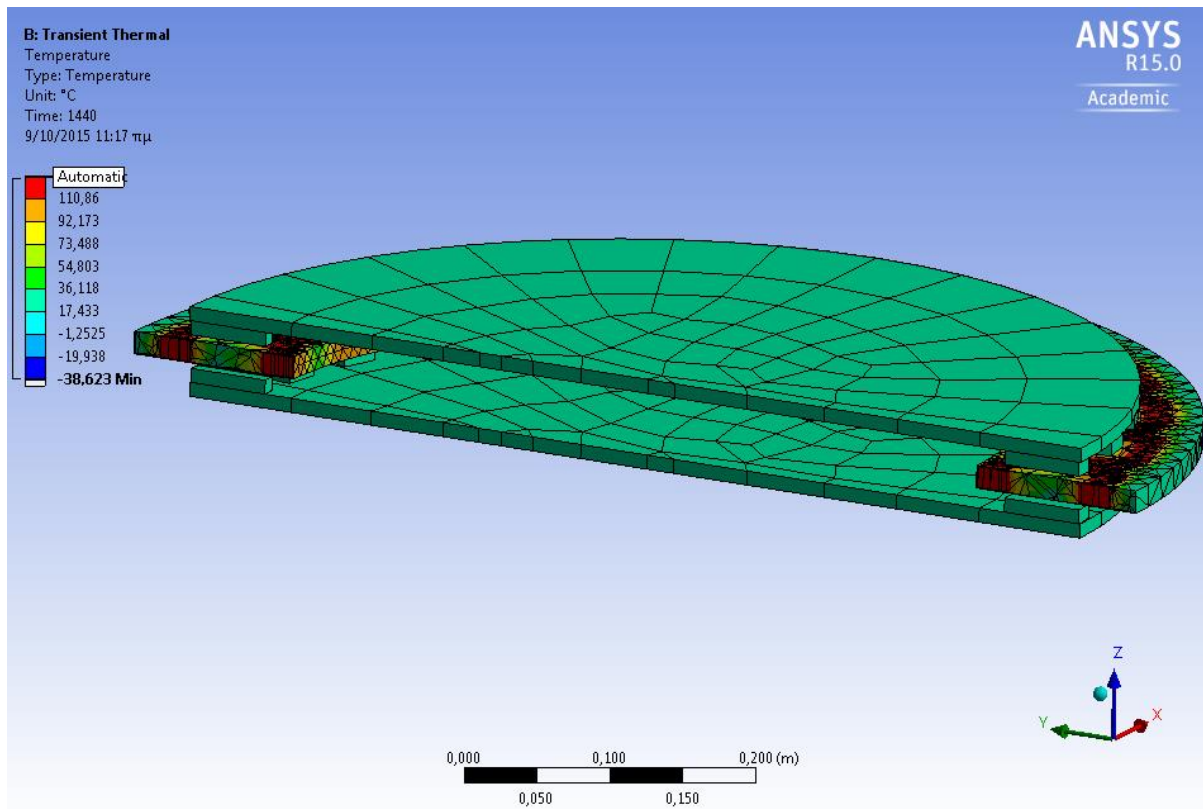
Σχήμα 4.43: Αποτέλεσμα προσομοίωσης γεννήτριας 5 kW για ρεύμα 40.84 A.

Για λεπτομερέστερη παρατήρηση των αποτελεσμάτων στην περιοχή ενδιαφέροντος, δηλαδή στα πηνία, ακολουθεί το παρακάτω σχήμα που απεικονίζει την κάθετη στον άξονα τομή της γεννήτριας:



Σχήμα 4.44: Κάθετη τομή αποτελέσματος προσομοίωσης γεννήτριας 5 kW.

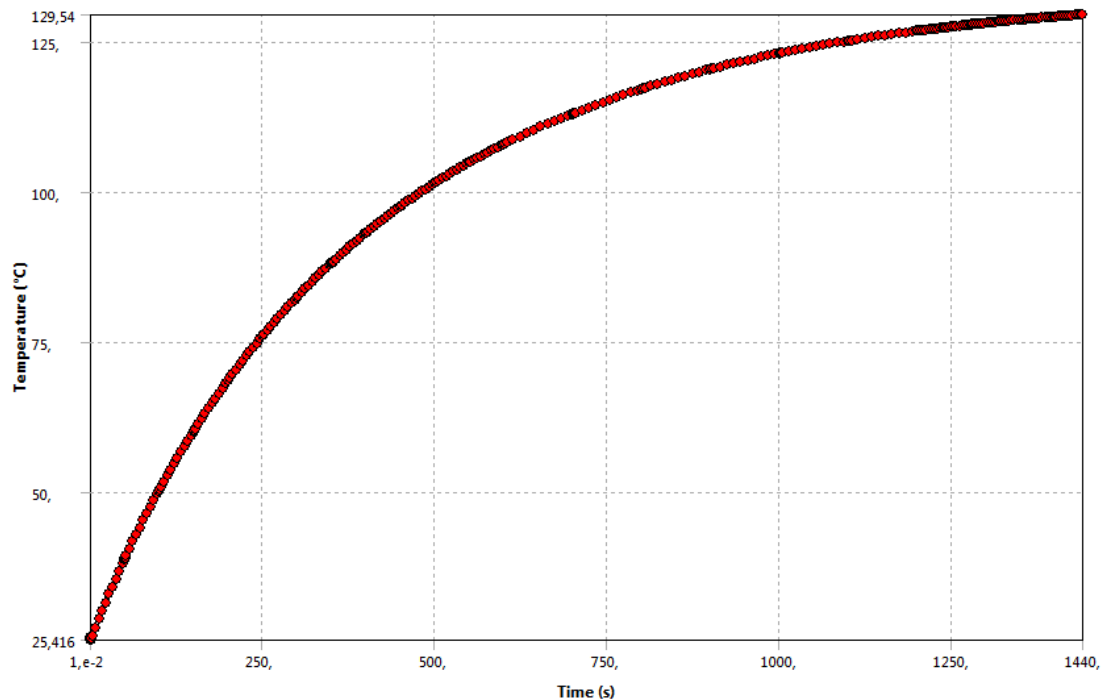
Παρατηρείται πως η αύξηση της θερμοκρασίας είναι ιδιαίτερα έντονη στα τυλίγματα του χαλκού και σε μικρότερο βαθμό στη ρητίνη που τα περιβάλλει. Οι δρομείς και οι μόνιμοι μαγνήτες δεν παρουσιάζουν έντονη αύξηση της θερμοκρασίας τους, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.43. Αξίζει να σημειωθεί πως, όπως και στην περίπτωση της γεννήτριας ισχύος 600 W, η κατανομή της θερμότητας είναι ομοιόμορφη σε κάθε πηνίο και εξαπλώνεται στη ρητίνη που εφάπτεται με τα τυλίγματα. Η ομοιόμορφη αυτή εξάπλωση φαίνεται και στην ακόλουθη αξονοσυμμετρική τομή της γεννήτριας:



Σχήμα 4.45: Αξονοσυμμετρική τομή αποτελέσματος προσομοίωσης γεννήτριας 5 kW.

Στο παραπάνω σχήμα μπορούμε να δούμε και πάλι πως η θερμοκρασία στη ρητίνη αυξάνεται περισσότερο στα τμήματα αυτά που βρίσκονται στην εσωτερική πλευρά των πηνίων. Όσο μάλιστα πλησιάζουμε τον χαλκό τόσο αυξάνεται η θερμοκρασία της ρητίνης.

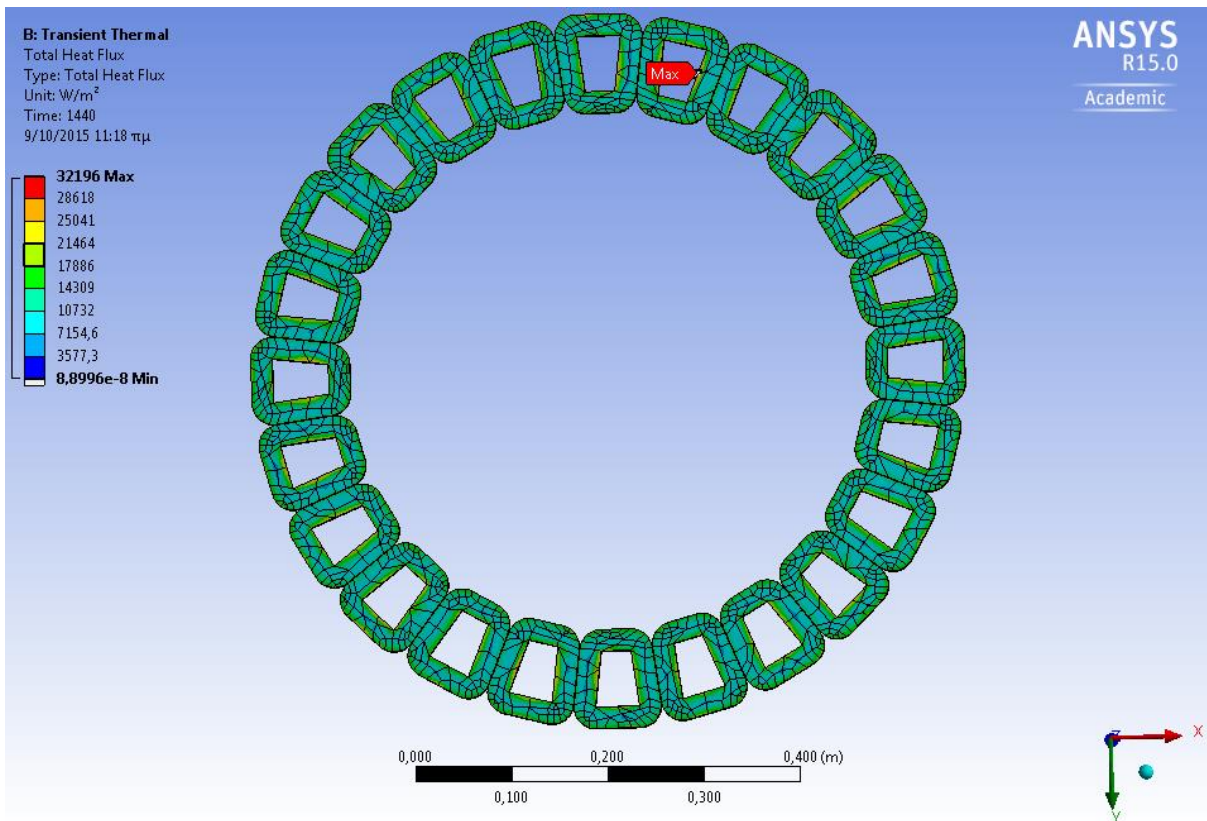
Παρακάτω φαίνεται η αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας στη γεννήτρια 5 kW:



Σχήμα 4.46: Καμπύλη θερμοκρασίας των τυλιγμάτων συναρτήσει του χρόνου.

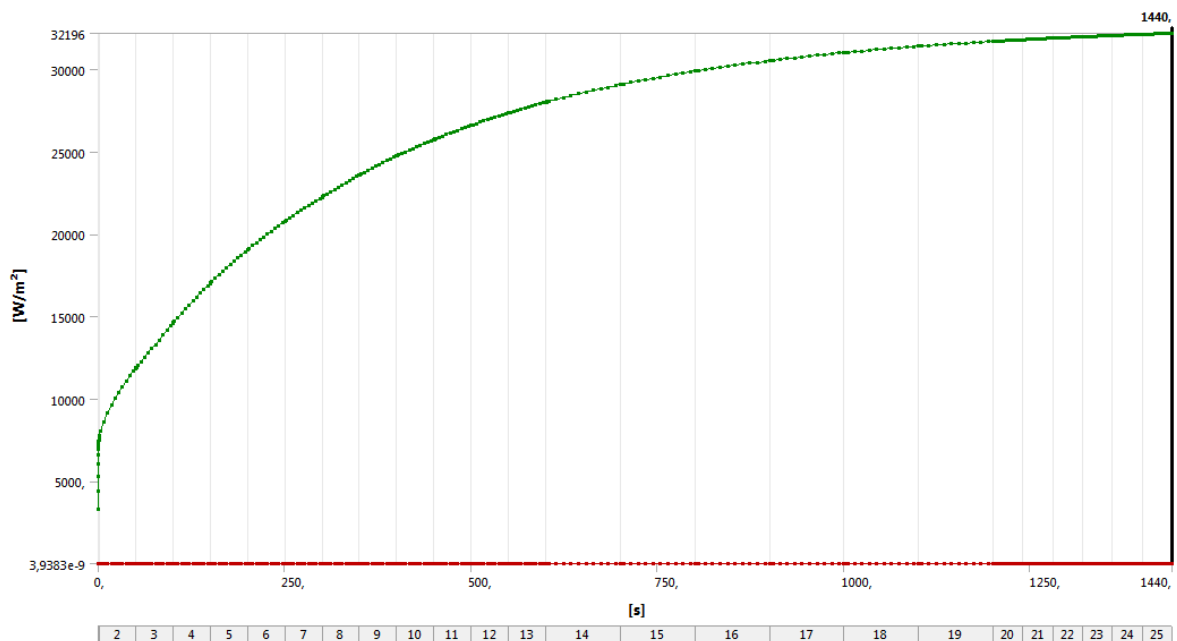
Είναι εμφανής η σταδιακή πτώση της κλίσης του γραφήματος έως ότου τείνει να σταθεροποιηθεί σε μια τελική θερμοκρασία. Συγκρίνοντας το παραπάνω γράφημα με τα αντίστοιχα της γεννήτριας 600 W για τα διάφορα ρεύματα λειτουργίας της, παρατηρεί κανείς τη μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας στη γεννήτρια 5 kW , γεγονός που οφείλεται στο σαφώς μεγαλύτερο ρεύμα που διαρρέει τα τυλίγματα του χαλκού, παρά τις βελτιωμένες δυνατότητες ψύξης της συγκεκριμένης γεννήτριας.

Το ακόλουθο γράφημα απεικονίζει την πυκνότητα της θερμορροής στα πηνία, καθώς και το σημείο όπου παρουσιάζεται η μέγιστη τιμή της πυκνότητας αυτής:



Σχήμα 4.47: Πυκνότητα θερμορροής στα τυλιγμάτα της γεννήτριας 5 kW.

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, η τιμή αυτή λαμβάνεται στην εσωτερική πλευρά των πηνίων, ενώ οπουδήποτε αλλού εκτός των τυλιγμάτων η πυκνότητα θερμορροής είναι μηδενική, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο γράφημα:



Σχήμα 4.36: Καμπύλη μέγιστης και ελάχιστης πυκνότητας θερμορροής στη γεννήτρια 5 kW.

Από το παραπάνω γράφημα προκύπτει πως η πυκνότητα θερμορροής, όπως αναμενόταν και από τις προηγούμενες προσομοιώσεις, ακολουθεί την ίδια συμπεριφορά με τη θερμοκρασία του πηνίου.

4.6 Συμπεράσματα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων

Μέσω της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα για τη θερμική ανάλυση των γεννητριών:

- Κύρια εστία θερμότητας στη γεννήτρια είναι τα τυλίγματα του χαλκού, στα οποία γίνεται και η παραγωγή της θερμότητας. Η θερμότητα κατανέμεται ομοιόμορφα στο κάθε τύλιγμα.
- Τα τμήματα της ρητίνης που ζεσταίνονται περισσότερο είναι αυτά που βρίσκονται στο εσωτερικό των πηνίων, μέρος όπου εμφανίζεται και η μέγιστη πυκνότητα θερμορροής από τον χαλκό.
- Από το παραπάνω συμπέρασμα προκύπτει ότι η θερμοκρασία και η θερμορροή παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία στα τυλίγματα του χαλκού τόσο περισσότερη θερμότητα απάγεται στην περιβάλλουσα ρητίνη, δηλαδή μεγαλύτερη θερμορροή. Οι καμπύλες και των δύο μεγεθών μπορούν να χαρακτηριστούν λογαριθμικές, καθώς με την πάροδο του χρόνου σταθεροποιούνται σε μια τελική τιμή.
- Οι δίσκοι του δρομέα και οι μόνιμοι μαγνήτες φαίνεται πως είναι τα μόνα τμήματα της μηχανής που δεν επηρεάζονται από την παραγωγή θερμότητας του χαλκού. Το γεγονός αυτό ίσως δικαιολογείται από το ότι τα μέρη αυτά δεν έρχονται σε άμεση επαφή με τον χαλκό και το διάκενο αέρα που τους χωρίζει έχει προσομοιωθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να αντικατοπτρίζει κανονικές συνθήκες λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας. Αυτό συνεπάγεται υψηλές τιμές για τους συντελεστές συναγωγής και αυξημένη ψύξη από τη ροή του αέρα στο διάκενο.

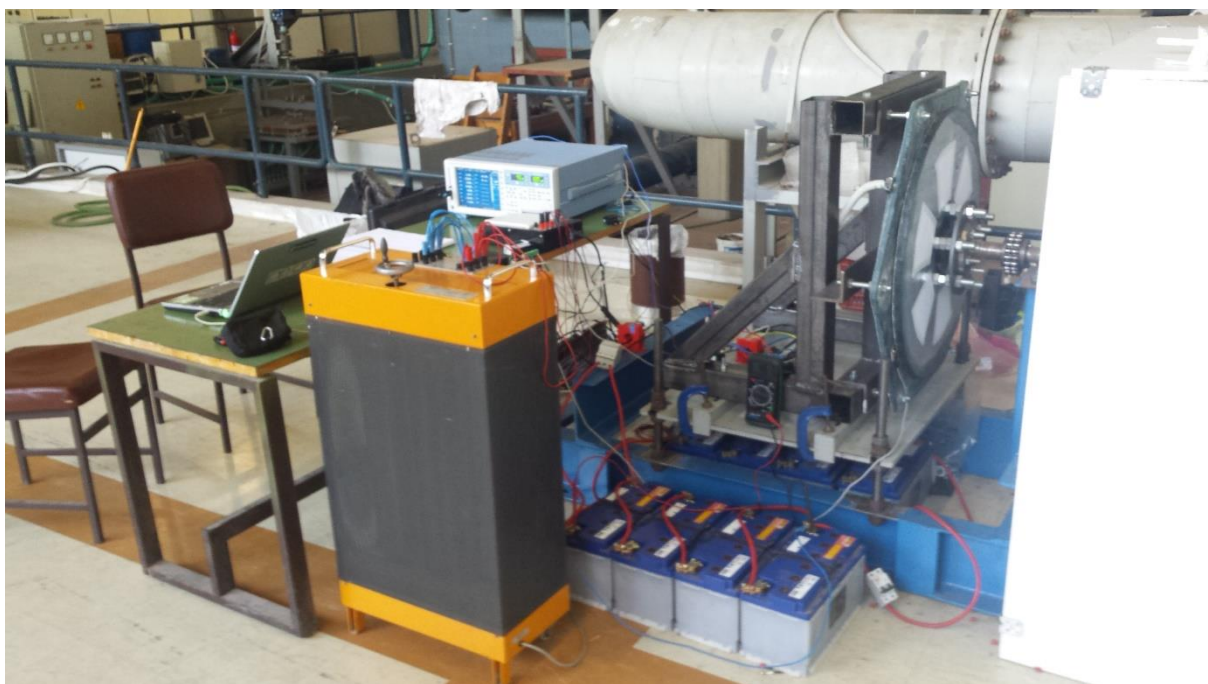
Κεφάλαιο 5: Πειραματικές μετρήσεις

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν οι μετρήσεις που ελήφθησαν κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων στο εργαστήριο και για τις δύο γεννήτριες, ώστε να εξακριβωθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, καθώς και οι μετρήσεις της γεννήτριας 600 W από τη λειτουργία της στο πεδίο δοκιμών.

5.1 Πειραματική διάταξη

Οι γεννήτριες 600 W και 5 kW μεταφέρθηκαν στο Εργαστήριο Υδροδυναμικής της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., όπου είναι διαθέσιμος κινητήρας DC ονομαστικής ισχύος 110 kW και ονομαστικών στροφών 3000 RPM, στον οποίο οι γεννήτριες τοποθετήθηκαν ως φορτία.

Στην Εικόνα 5.1 φαίνεται η πειραματική διάταξη για τη γεννήτρια ισχύος 5 kW:



Εικόνα 5.1: Πειραματική διάταξη γεννήτριας 5 kW.

Η γεννήτρια ισχύος 600 W συνδέεται μέσω ενός καλωδίου μήκους 70 m σε έναν ανορθωτή και από εκεί σε μια συστοιχία μπαταριών. Το καλώδιο αυτό χρησιμοποιείται στην ανεμογεννήτρια στο πεδίο δοκιμών, έτσι ώστε η γεννήτρια να δουλεύει σε υψηλότερη τάση και να έχει υψηλότερες στροφές και μεγαλύτερο αεροδυναμικό συντελεστή. Το μειονέκτημα αυτής της σύνδεσης είναι η μεγάλη πτώση τάσης που διαθέτει. Στη διάταξη του πειράματος χρησιμοποιείται για να προσομοιωθεί το πεδίο δοκιμών και να μπορέσουμε να συγκρίνουμε τα δύο αποτελέσματα. Η γεννήτρια ισχύος 5 kW δεν τοποθετήθηκε στο πεδίο δοκιμών και έτσι το καλώδιο αυτό δεν χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διάταξη. Η ρύθμιση της

λειτουργίας της γεννήτριας, και συγκεκριμένα του ρεύματος, γίνεται μέσω των στροφών του κινητήρα DC.

Η μέτρηση των τάσεων και των ρευμάτων σε κάθε φάση της γεννήτριας γίνεται με τη χρήση ενός ψηφιακού παλμογράφου. Μέσω της συχνότητας από τον παλμογράφο γίνεται η μέτρηση των στροφών, ενώ για τη μέτρηση της ροπής τοποθετείται ένα ροπόμετρο μεταξύ κινητήρα και γεννήτριας. Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας στη γεννήτρια 600 W χρησιμοποιείται ένας αισθητήρας θερμότητας PT 100 στην επιφάνεια της ρητίνης, δίπλα ακριβώς στο «πόδι» του τυλίγματος. Ο αισθητήρας αυτός στέλνει ένα σήμα τάσης, το οποίο μετατρέπεται σε θερμοκρασία από έναν μετατροπέα σήματος. Σύμφωνα με τα στοιχεία του κατασκευαστή, η συμπεριφορά του αισθητήρα είναι σχεδόν γραμμική στο εύρος τιμών 0 °C – 100 °C, έχοντας ένα σφάλμα τιμών της τάξης των 0.4 °C στους 50 °C. Έτσι, για λόγους ευκολίας δε γίνεται βαθμονόμηση (calibration) των μετρήσεων. Επιπλέον, γίνεται χρήση ενός θερμόμετρου, δηλαδή μίας συσκευής laser, η οποία μέσω υπέρυθρης ακτινοβολίας μετρά τη θερμοκρασία του στάτη. Τέλος, στη γεννήτρια 5 kW, πέρα από την χρήση των δύο προηγούμενων μεθόδων, τοποθετήθηκε κατά την κατασκευή της και ένας αισθητήρας θερμότητας σε επαφή με το τυλίγμα του χαλκού, ώστε να δίνει ακριβέστερα αποτελέσματα για τη θερμοκρασία των πηνίων.



Εικόνα 5.2: Μέτρηση αισθητήρα θερμότητας στο τυλίγμα του χαλκού.

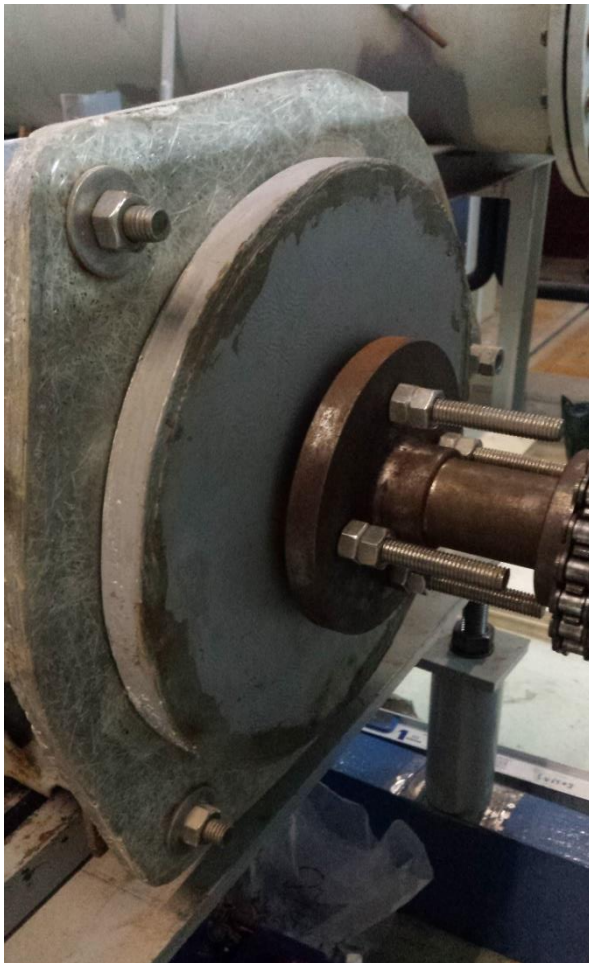


Εικόνα 5.3: Θερμόμετρο.

5.2 Επεξεργασία πειραματικών μετρήσεων

5.2.1 Αποτελέσματα σύγχρονης γεννήτριας AFPM 600 W

Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται η γεννήτρια ισχύος 600 W, καθώς και ο αισθητήρας θερμότητας που έχει τοποθετηθεί στην επιφάνεια του στάτη:

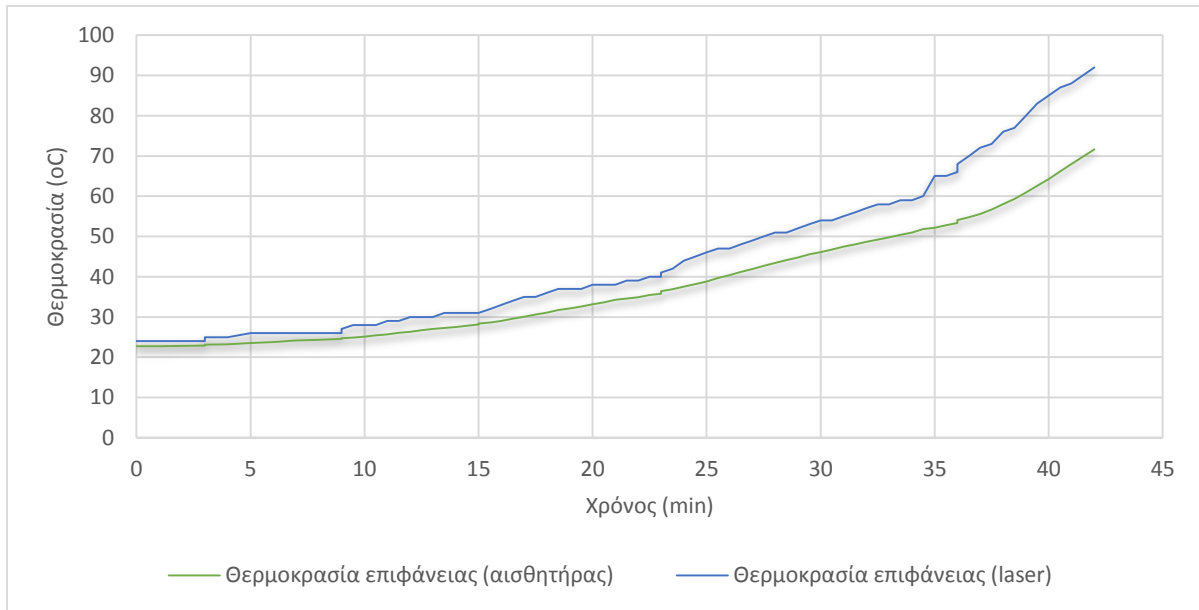


Εικόνα 5.4: Γεννήτρια 600 W.



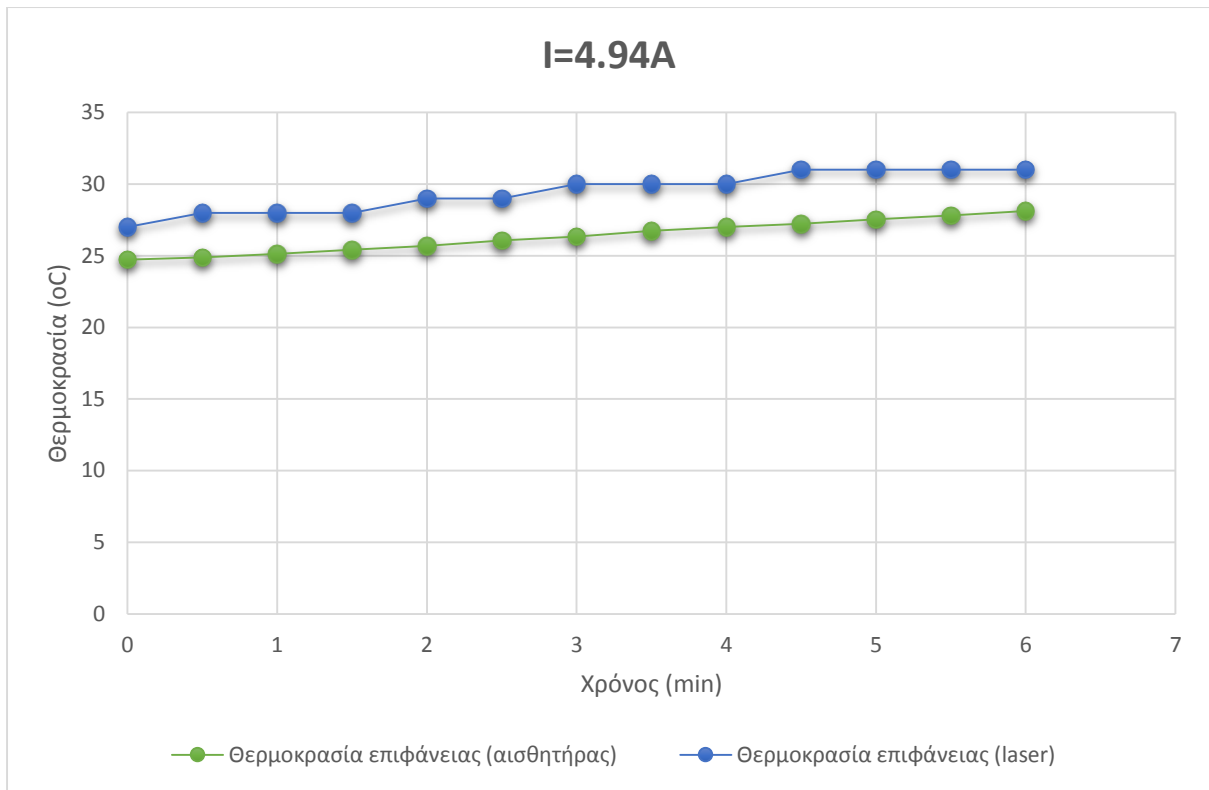
Εικόνα 5.5: Αισθητήρας θερμότητας στο στάτη.

Στο πρώτο πείραμα που εκτελείται, αυξάνεται σταδιακά το ρεύμα της γεννήτριας, ώστε να παρατηρηθεί η θερμική συμπεριφορά της γεννήτριας. Συγκεκριμένα, επιλέγονται έξι διαφορετικά ρεύματα λειτουργίας στα οποία θα εξεταστεί η γεννήτρια. Κάθε μισό λεπτό σημειώνεται τόσο η θερμοκρασία που δείχνει ο αισθητήρας όσο και αυτή που μετρά το θερμόμετρο. Όταν παρατηρείται σταθεροποίηση της θερμοκρασίας για συγκεκριμένο ρεύμα λειτουργίας, το ρεύμα αυξάνεται και πηγαίνουμε στο επόμενο στάδιο. Παρακάτω θα παρουσιαστεί το συνολικό γράφημα της θερμοκρασίας του στάτη για όλα τα ρεύματα λειτουργίας από 1 A έως 11A με βάση τους δύο τρόπους μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν:

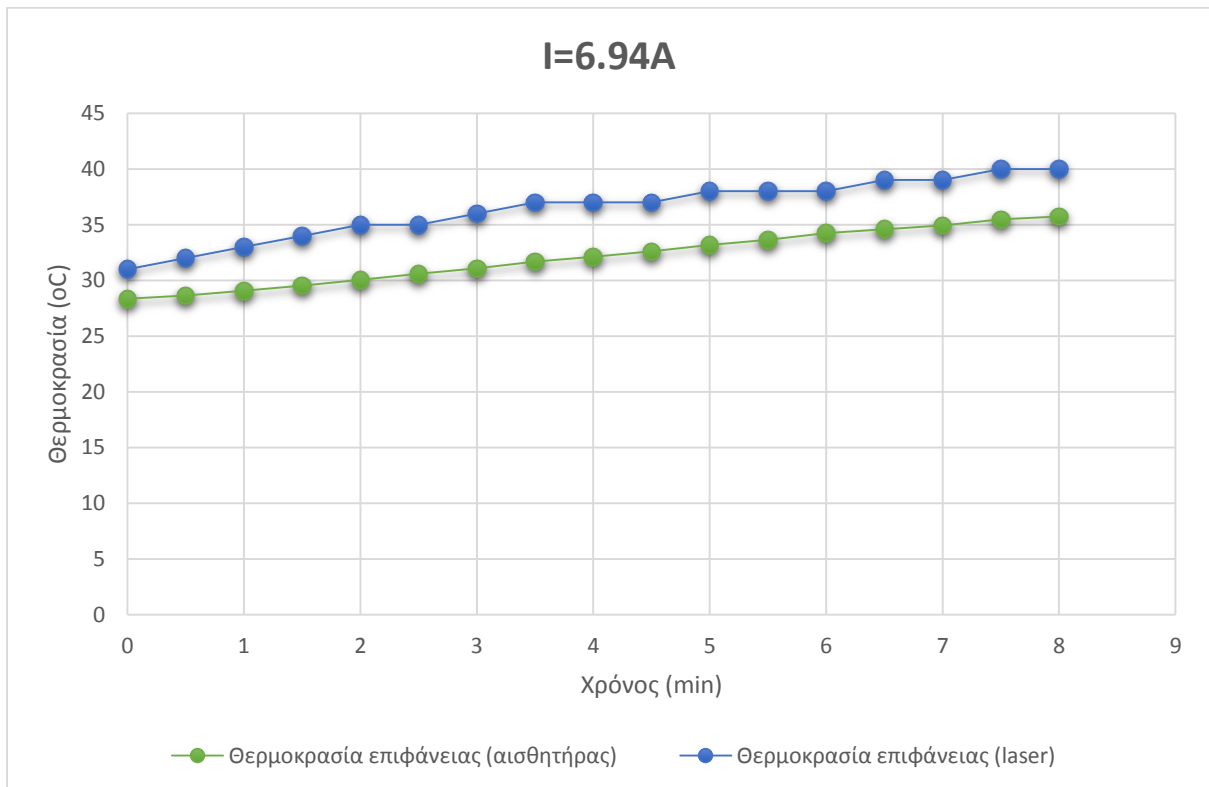


Σχήμα 5.1: Θερμοκρασία του στάτη συναρτήσει του χρόνου για όλα τα ρεύματα λειτουργίας.

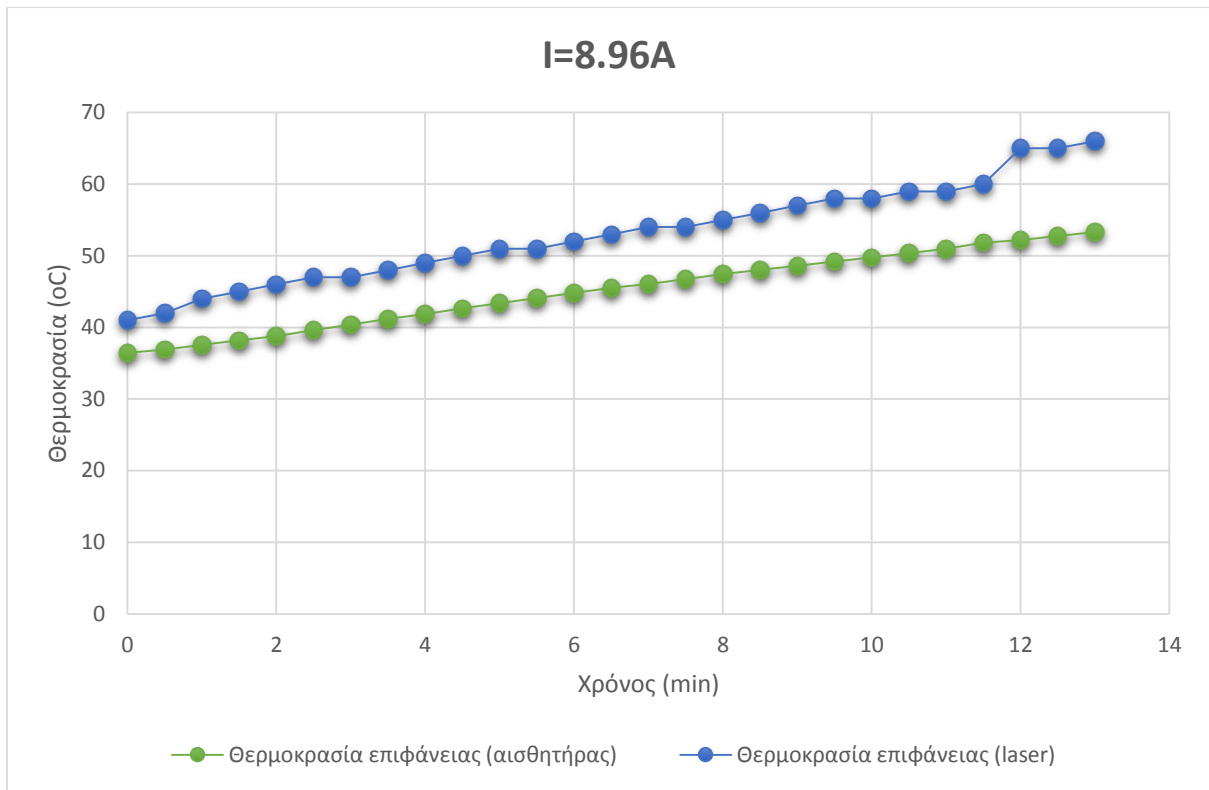
Στο παραπάνω γράφημα φαίνεται η σταθεροποίηση θερμοκρασίας για κάθε ρεύμα λειτουργίας, από τα μικρά «σκαλοπάτια» που δημιουργούνται στις καμπύλες των θερμοκρασιών. Η σταθεροποίηση της θερμοκρασίας φαίνεται ακόμα πιο καθαρά στα ακόλουθα γραφήματα, όπου απεικονίζεται η θερμοκρασία του στάτη για κάθε ρεύμα ξεχωριστά:



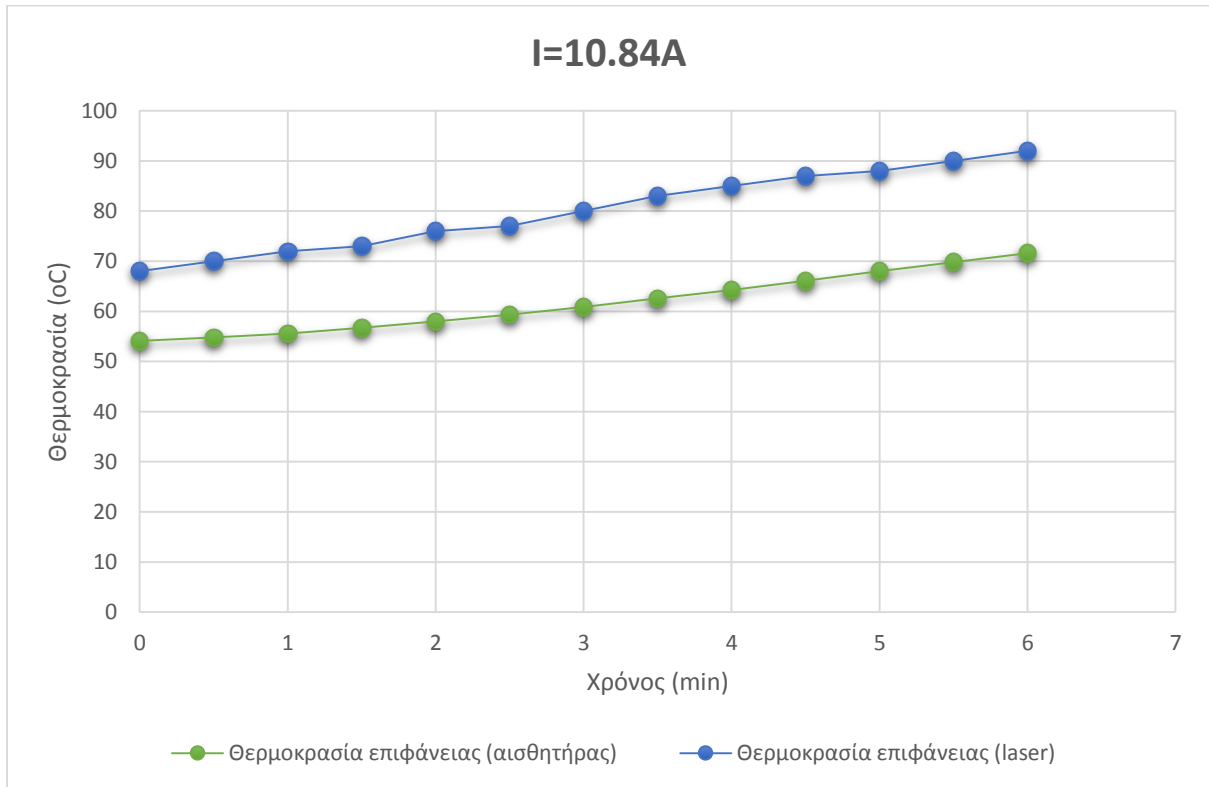
Σχήμα 5.2: Θερμοκρασία του στάτη συναρτήσει του χρόνου για ρεύμα 4.94 A.



Σχήμα 5.3: Θερμοκρασία του στάτη συναρτήσει του χρόνου για ρεύμα 6.94 A.



Σχήμα 5.4: Θερμοκρασία του στάτη συναρτήσει του χρόνου για ρεύμα 8.96 A.



Σχήμα 5.5: Θερμοκρασία του στάτη συναρτήσει του χρόνου για ρεύμα 10.84 A.

Πέρα από τη σταθεροποίηση της θερμοκρασίας, παρατηρώντας τα ανωτέρω γραφήματα προκύπτει ένα ακόμη συμπέρασμα. Οι δύο μέθοδοι μέτρησης δίνουν αποτελέσματα με μια σημαντική απόκλιση μεταξύ τους. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι ο αισθητήρας της θερμοκρασίας που έχει τοποθετηθεί στην επιφάνεια του στάτη, δίπλα ακριβώς στην άκρη του δίσκου, ψύχεται από τη ροή αέρα που προκύπτει από την περιστροφή του δρομέα. Έτσι, ενώ οι μετρήσεις γίνονται στο ίδιο σημείο του στάτη και θα περιμέναμε μικρή απόκλιση μεταξύ τους, εντούτοις βλέπουμε πως ο αισθητήρας μετρά αρκετά χαμηλότερη θερμοκρασία από το laser, το οποίο μέσω της υπέρυθρης ακτινοβολίας φαίνεται να μην επηρεάζεται από τη ροή του αέρα. Το συμπέρασμα αυτό εξακριβώνεται και από τις μετρήσεις που ελήφθησαν και αφότου σταμάτησε να περιστρέφεται η γεννήτρια στη διεξαγωγή του πειράματος για τη γεννήτρια 5 kW.

Παρακάτω θα παρουσιαστούν οι μέσες τιμές του ρεύματος, της τάσης, της ροπής, της ταχύτητας περιστροφής, της ηλεκτρικής και μηχανικής ισχύος, καθώς και ο βαθμός απόδοσης για κάθε ρεύμα λειτουργίας, που προέκυψαν από τις μετρήσεις του παλμογράφου:

Ρεύμα (A)	Τάση (V)	Ροπή (Nm)	Ταχύτητα περιστροφής (RPM)	PeI (W)	Pmech (W)	Βαθμός απόδοσης (%)
1.02	38.006	3.359	234.008	66.959	82.385	81.276
2.89	39.424	7.991	260.641	197.266	218.074	90.458
4.94	41.208	13.638	292.84	352.458	418.142	84.292
6.94	42.796	18.934	325.532	514.719	645.323	79.762
8.96	44.423	24.27	361.187	689.17	917.791	75.09
10.84	45.979	31.6	403.798	863.437	1336.0855	64.624

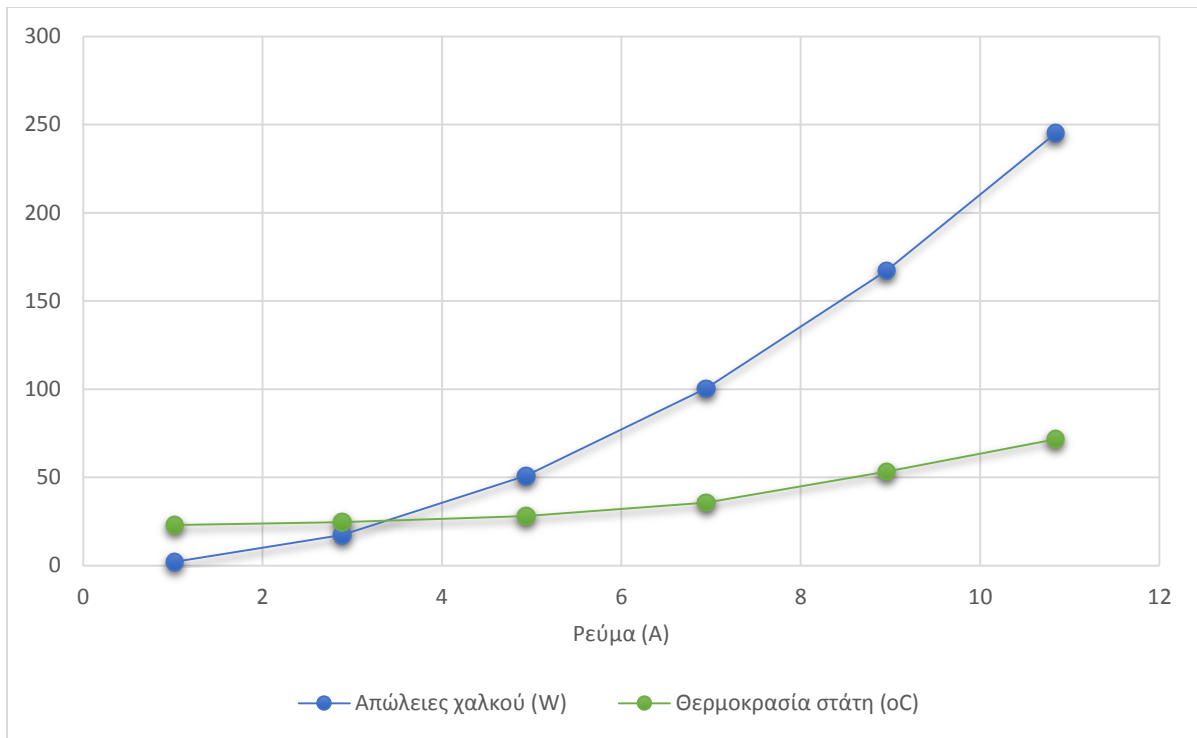
Πίνακας 5.1: Μέσες τιμές μετρούμενων μεγεθών.

Επιπλέον, παρατίθενται οι τελικές θερμοκρασίες του στάτη και οι απώλειες του χαλκού για κάθε ρεύμα:

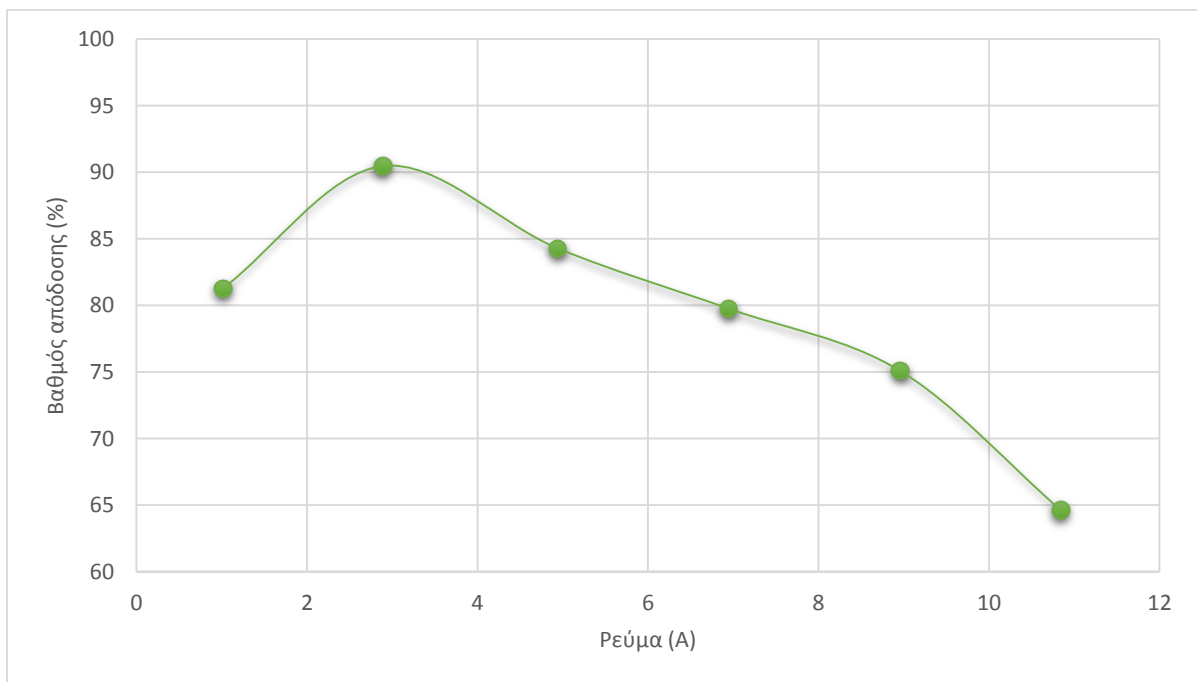
Ρεύμα (A)	Θερμοκρασία στάτη (oC)	Απώλειες χαλκού (W)
1.02	22.93	2.158
2.89	24.58	17.403
4.94	28.12	50.851
6.94	35.74	100.552
8.96	53.31	167.292
10.84	71.62	245.122

Πίνακας 5.2: Τελική θερμοκρασία στάτη και απώλειες χαλκού για κάθε ρεύμα λειτουργίας.

Από τους Πίνακες 5.1 και 5.2 προκύπτουν τα ακόλουθα γραφήματα, όπου στο ένα απεικονίζονται οι απώλειες χαλκού και η θερμοκρασία του στάτη συναρτήσει του ρεύματος και στο άλλο ο βαθμός απόδοσης συναρτήσει του ρεύματος:



Σχήμα 5.6: Θερμοκρασία στάτη και απώλειες χαλκού συναρτήσει του ρεύματος.

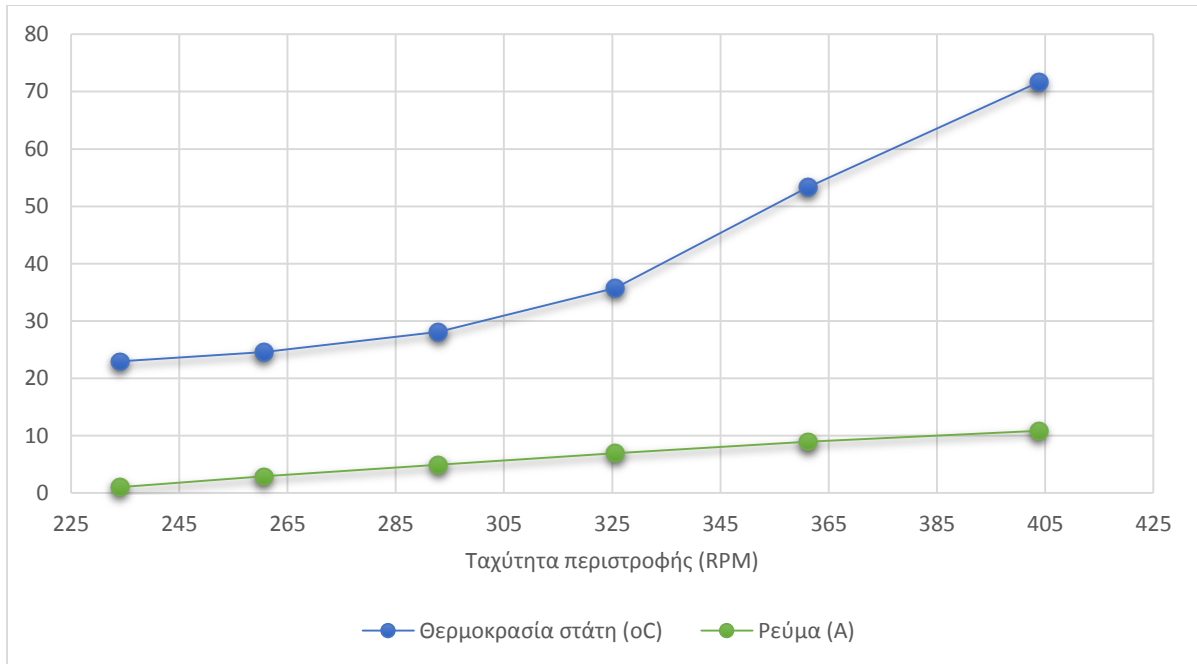


Σχήμα 5.7: Βαθμός απόδοσης συναρτήσει του ρεύματος.

Από τα παραπάνω γραφήματα φαίνεται η εξάρτηση των απωλειών του χαλκού από το τετράγωνο του ρεύματος και η εξάρτηση της θερμοκρασίας από τις απώλειες του χαλκού, καθώς, παρά το γεγονός ότι μειώνεται λόγω της ροής του αέρα στον αισθητήρα, τείνει να ακολουθήσει τη μορφή της καμπύλης των απωλειών. Αντιθέτως, παρατηρείται πως ο βαθμός απόδοσης, ενώ αρχικά παρουσιάζει μια αυξητική τάση, στη συνέχεια μειώνεται με

την αύξηση του ρεύματος, διότι αυξάνονται οι απώλειες σε σχέση με την παραγόμενη ισχύ, ενώ αρνητικά επιδρά και η αύξηση της αντίστασης λόγω της θερμοκρασίας.

Στο ακόλουθο γράφημα απεικονίζεται το ρεύμα και η θερμοκρασία του στάτη συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής:



Σχήμα 5.8: Θερμοκρασία στάτη και ρεύμα συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής.

Στο παραπάνω γράφημα φαίνεται η αύξηση του ρεύματος με την άνοδο των στροφών, γεγονός λογικό, καθώς μέσω των στροφών γίνεται ο έλεγχος της γεννήτριας και κατά συνέπεια του ρεύματος λειτουργίας της. Επιπλέον, παρατηρείται και πάλι η προαναφερθείσα εξάρτηση της θερμοκρασίας του στάτη από το ρεύμα.

Έπειτα, εξετάζεται η θερμική συμπεριφορά της γεννήτριας για σταθερό ρεύμα λειτουργίας. Συγκεκριμένα, διεξήχθησαν τρία πειράματα με ρεύματα λειτουργίας 7.03 A, 7.72 A και 8.96 A, μέχρις ότου η θερμοκρασία να τείνει να σταθεροποιηθεί. Αυτές οι συνθήκες λειτουργίας για τη γεννήτρια 600 W προσομοιώθηκαν και στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στο Κεφάλαιο 4.

Για ρεύμα λειτουργίας $I=7.03 A$

Στον Πίνακα 5.3 παρατίθενται οι μέσες τιμές ρεύματος, τάσης, ροπής, ταχύτητας περιστροφής, ηλεκτρικής και μηχανικής ισχύος, καθώς και ο βαθμός απόδοσης για κάθε ρεύμα λειτουργίας, που προέκυψαν από τις μετρήσεις του παλμογράφου:

Ρεύμα (A)	Τάση (V)	Ροπή (Nm)	Ταχύτητα περιστροφής (RPM)	Pel (W)	Pmech (W)	Βαθμός απόδοσης (%)
7.03	46.395	18.894	357.075	565.191	706.396	80.01051

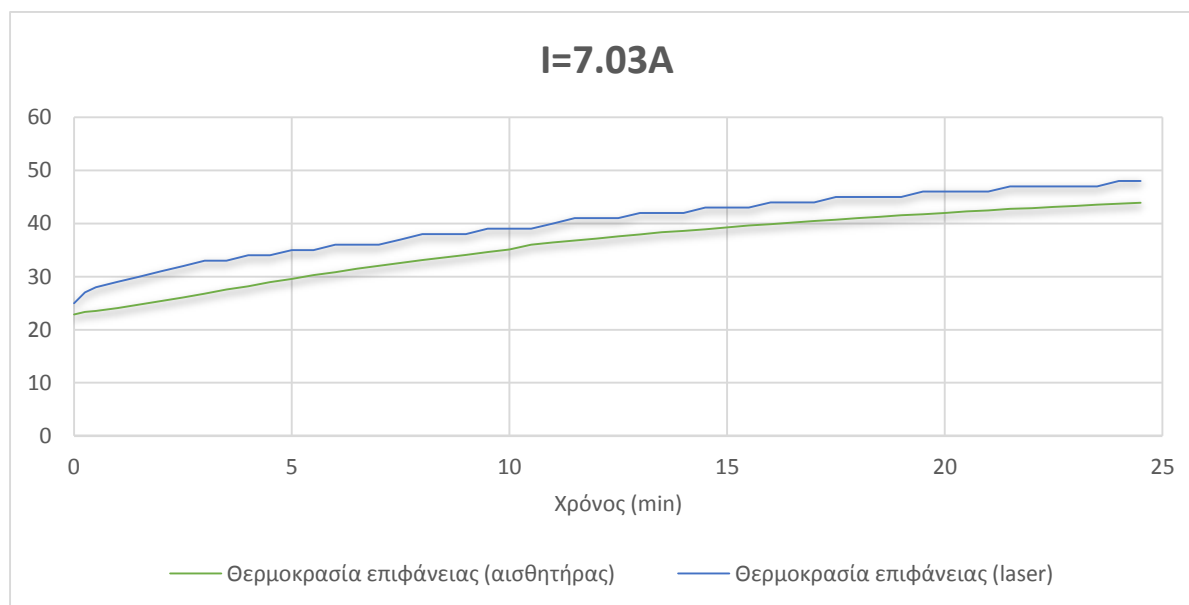
Πίνακας 5.3: Μέσες τιμές μετρούμενων μεγεθών.

Στον Πίνακα 5.4 παρουσιάζονται η τελική θερμοκρασία του στάτη έπειτα από 24.5 λεπτά και οι απώλειες του χαλκού για το συγκεκριμένο ρεύμα:

Ρεύμα (A)	Θερμοκρασία στάτη (°C)	Απώλειες χαλκού (W)
7.03	43.94	103.155

Πίνακας 5.4: Τελική θερμοκρασία στάτη και απώλειες χαλκού.

Στο Σχήμα 5.9 φαίνονται οι πειραματικές μετρήσεις από τον αισθητήρα και το θερμόμετρο, που λαμβάνονταν κάθε μισό λεπτό:



Σχήμα 5.9: Θερμοκρασία επιφάνειας για ρεύμα 7.03 A.

Όπως και προηγουμένως, παρατηρείται διαφορά μεταξύ των μετρήσεων του αισθητήρα και του θερμόμετρου λόγω της ροής του αέρα και της επακόλουθης ψύξης που προξενεί στον αισθητήρα.

Για ρεύμα λειτουργίας $I=7.72\text{ A}$

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται αυτή τη φορά για ρεύμα 7.72 A και χρόνο εκτέλεσης του πειράματος πάλι 24.5 λεπτά. Οι μέσες τιμές των μεγεθών που μας ενδιαφέρουν παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Ρεύμα (A)	Τάση (V)	Ροπή (Nm)	Ταχύτητα περιστροφής (RPM)	P_{el} (W)	P_{mech} (W)	Βαθμός απόδοσης (%)
7.72	47.726	21.125	372.922	638.511	824.834	77.411

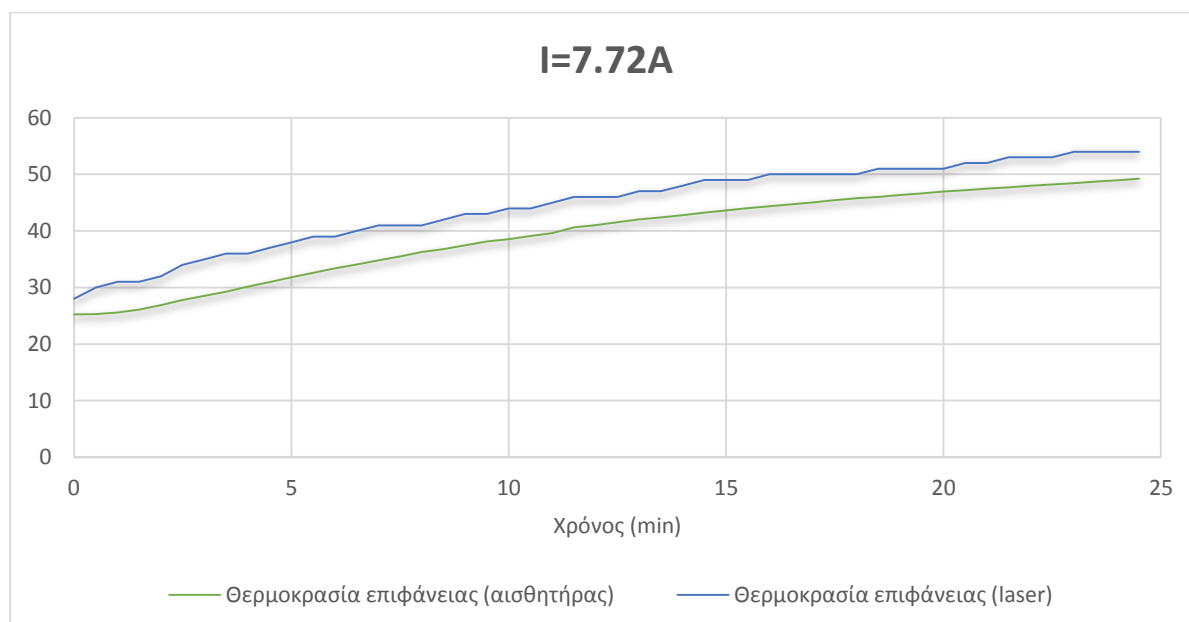
Πίνακας 5.5: Μέσες τιμές μετρούμενων μεγεθών.

Υπό εξέταση είναι φυσικά και η τελική θερμοκρασία του στάτη στο πέρας του πειράματος και οι απώλειες του χαλκού υπό αυτές τις συνθήκες λειτουργίας:

Ρεύμα (A)	Θερμοκρασία στάτη ($^{\circ}\text{C}$)	Απώλειες χαλκού (W)
7.72	49.24	124.418

Πίνακας 5.6: Τελική θερμοκρασία στάτη και απώλειες χαλκού.

Λαμβάνοντας μετρήσεις κάθε 30 sec προκύπτει η ακόλουθη γραφική παράσταση της θερμοκρασίας στάτη συναρτήσει του χρόνου για κάθε μέθοδο μέτρησης:



Σχήμα 5.10: Θερμοκρασία επιφάνειας για ρεύμα 7.72 A .

Για ρεύμα λειτουργίας $I=8.96\text{ A}$

Από το ροπόμετρο και τον ψηφιακό παλμογράφο, ο οποίος καταγράφει τα μεγέθη που επιθυμούμε να εξετάσουμε κάθε δευτερόλεπτο, προκύπτουν οι μέσες τιμές του ρεύματος, της τάσης, της ροπής, της ταχύτητας περιστροφής και της ισχύος, καθώς και ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας για το συγκεκριμένο ρεύμα:

Ρεύμα (A)	Τάση (V)	Ροπή (Nm)	Ταχύτητα περιστροφής (RPM)	P_{el} (W)	P_{mech} (W)	Βαθμός απόδοσης (%)
8.96	45.278	24.187	381.343	701.855	965.689	72.679

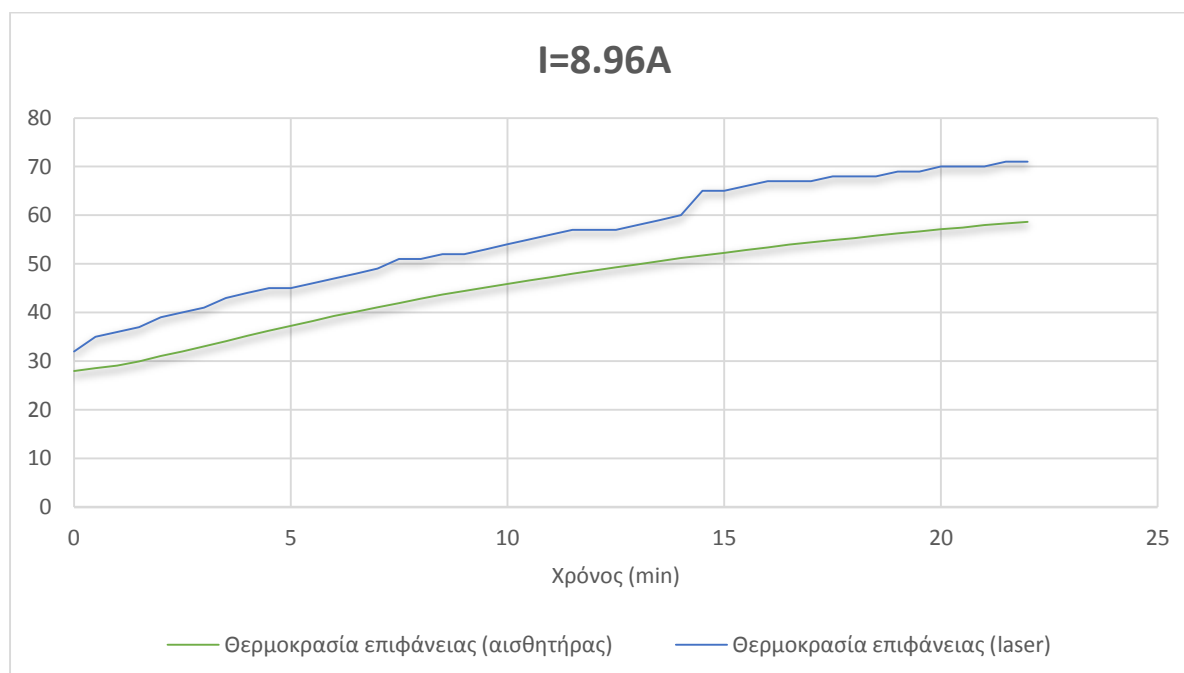
Πίνακας 5.7: Μέσες τιμές μετρούμενων μεγεθών.

Η τελική θερμοκρασία στην επιφάνεια του στάτη και οι απώλειες του χαλκού παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα:

Ρεύμα (A)	Θερμοκρασία στάτη ($^{\circ}\text{C}$)	Απώλειες χαλκού (W)
8.96	58.65	167.02

Πίνακας 5.8: Τελική θερμοκρασία στάτη και απώλειες χαλκού.

Για ρεύμα 8.96 A το πείραμα διεξήχθη για 22 λεπτά, με τις μετρήσεις να λαμβάνονται κάθε μισό λεπτό. Η θερμοκρασία συναρτήσεως του χρόνου έχει την εξής μορφή:

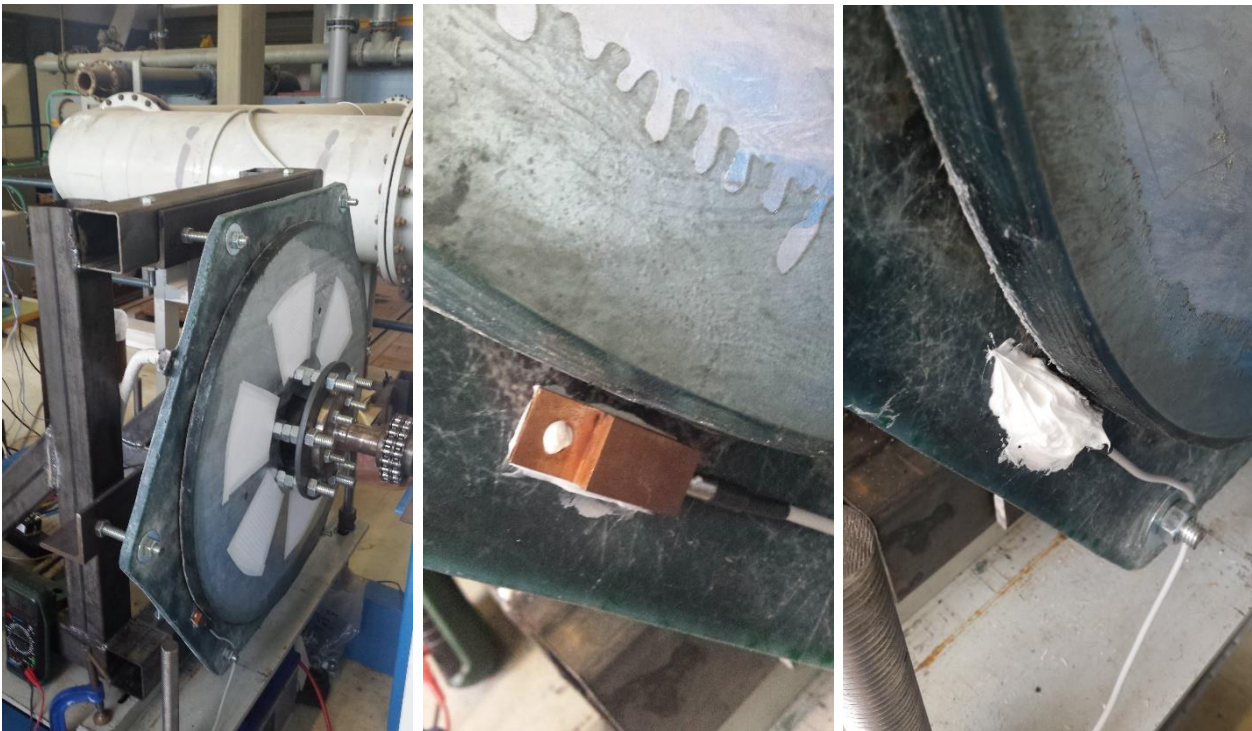


Σχήμα 5.11: Θερμοκρασία επιφάνειας για ρεύμα 8.96 A .

Όπως αναμενόταν, η θερμοκρασία δείχνει να σταθεροποιείται σταδιακά σε ένα χρονικό διάστημα 20 – 30 λεπτών, χρόνος που τόσο στις προσομοιώσεις όσο και στα πειράματα φαίνεται να είναι απαραίτητος για να φτάσει η θερμοκρασία της γεννήτριας στη μόνιμη κατάστασή της.

5.2.2 Αποτελέσματα σύγχρονης γεννήτριας AFPM 5 kW

Στη γεννήτρια αξονικής ροής μονίμων μαγνητών ισχύος 5 kW διεξήχθησαν τέσσερα πειράματα. Αρχικά, εξετάστηκε η συμπεριφορά της γεννήτριας για σταδιακή αύξηση του ρεύματος, με τους αεραγωγούς στους δίσκους του δρομέα ανοιχτούς. Έπειτα, καλύφθηκαν οι αεραγωγοί και επαναλήφθηκε η διαδικασία. Στη συνέχεια, με ανοιχτούς τους αεραγωγούς και πάλι, και με καλυμμένο με σιλικόνη τον αισθητήρα θερμοκρασίας στην επιφάνεια του στάτη, η γεννήτρια εξετάστηκε για λειτουργία υπό δύο σταθερές τιμές ρεύματος. Παρακάτω παρατίθενται φωτογραφίες της υπό εξέτασης γεννήτριας, καθώς και του αισθητήρα θερμοκρασίας:



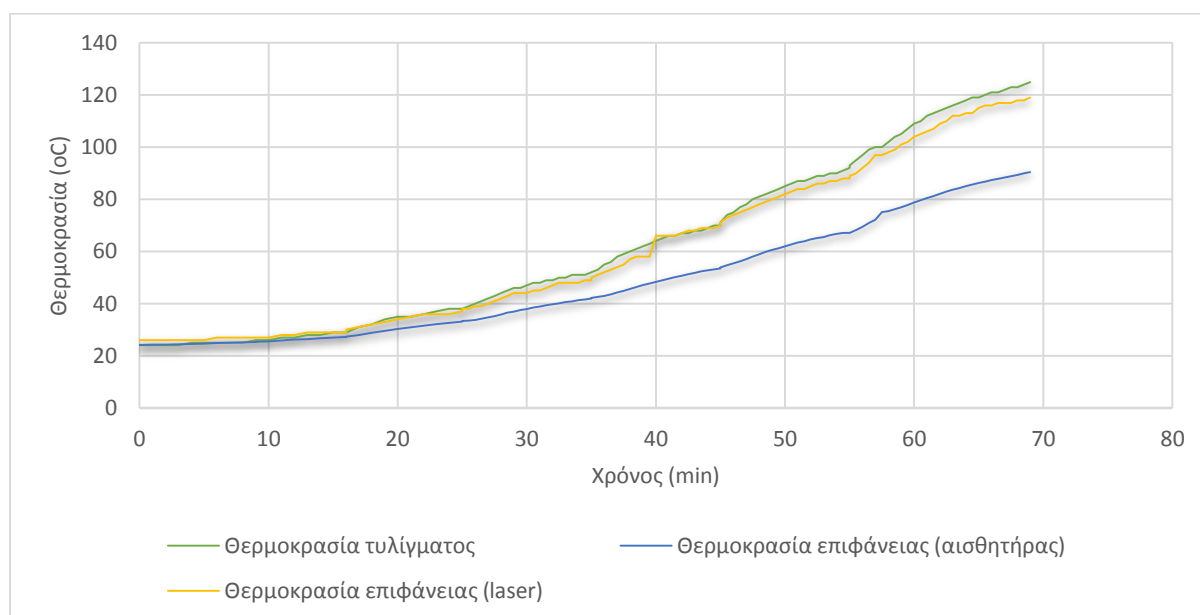
Εικόνα 5.6: Γεννήτρια 5 kW.

Εικόνα 5.7: (α) Αισθητήρας θερμότητας χωρίς κάλυμμα σιλικόνης.

(β) Αισθητήρας θερμότητας με κάλυμμα σιλικόνης.

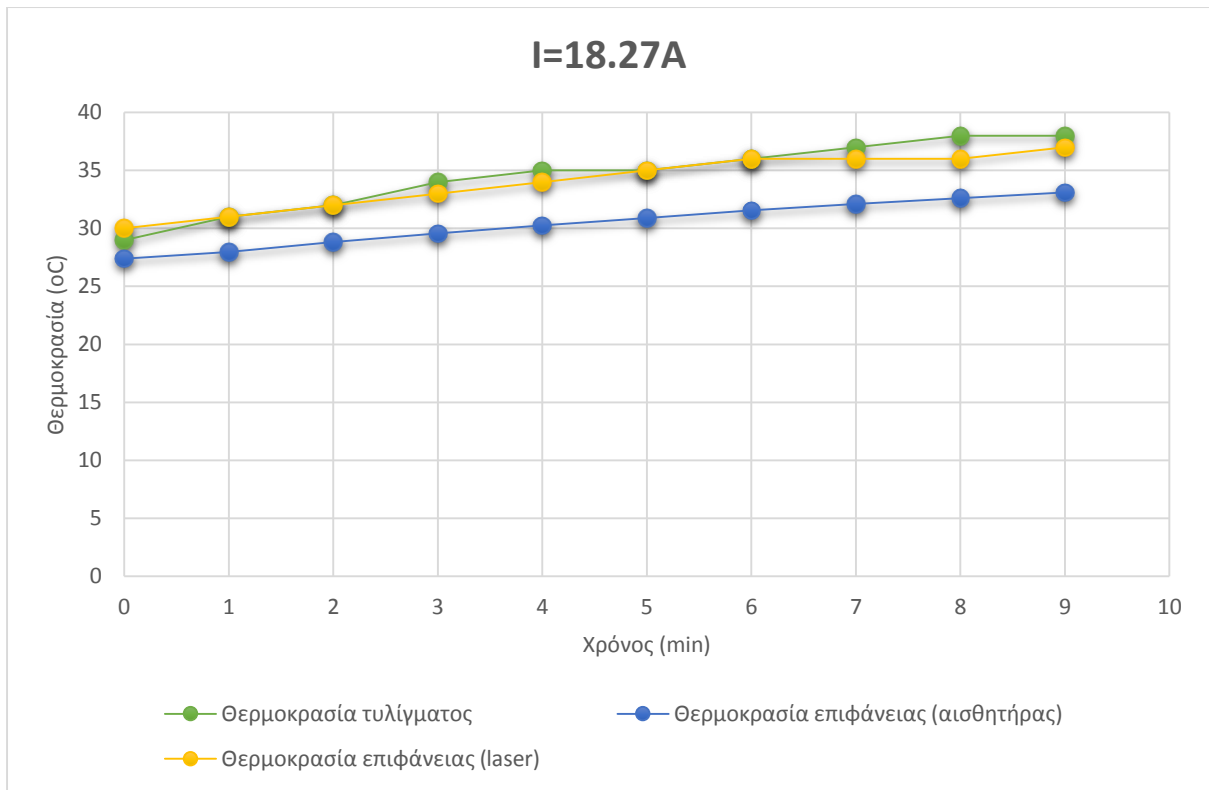
Με ανοιχτούς αεραγωγούς

Το πρώτο πείραμα που εκτελέστηκε ήταν με τον αισθητήρα της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του στάτη ακάλυπτο (Εικόνα 5.7(α)) και τους αεραγωγούς στους δίσκους του δρομέα ανοιχτούς. Λαμβάνοντας μετρήσεις κάθε λεπτό για μικρά ρεύματα και κάθε μισό λεπτό για μεγάλα, προκύπτει το ακόλουθο γράφημα, που περιλαμβάνει τις μετρήσεις των δύο προηγούμενων μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για τη γεννήτρια 600 W, καθώς και του αισθητήρα θερμοκρασίας που τοποθετήθηκε πάνω στο τυλίγμα. Σημειώνεται πως κάθε φορά που η θερμοκρασία έδειχνε να σταθεροποιείται, προχωράγαμε σε αύξηση του ρεύματος:

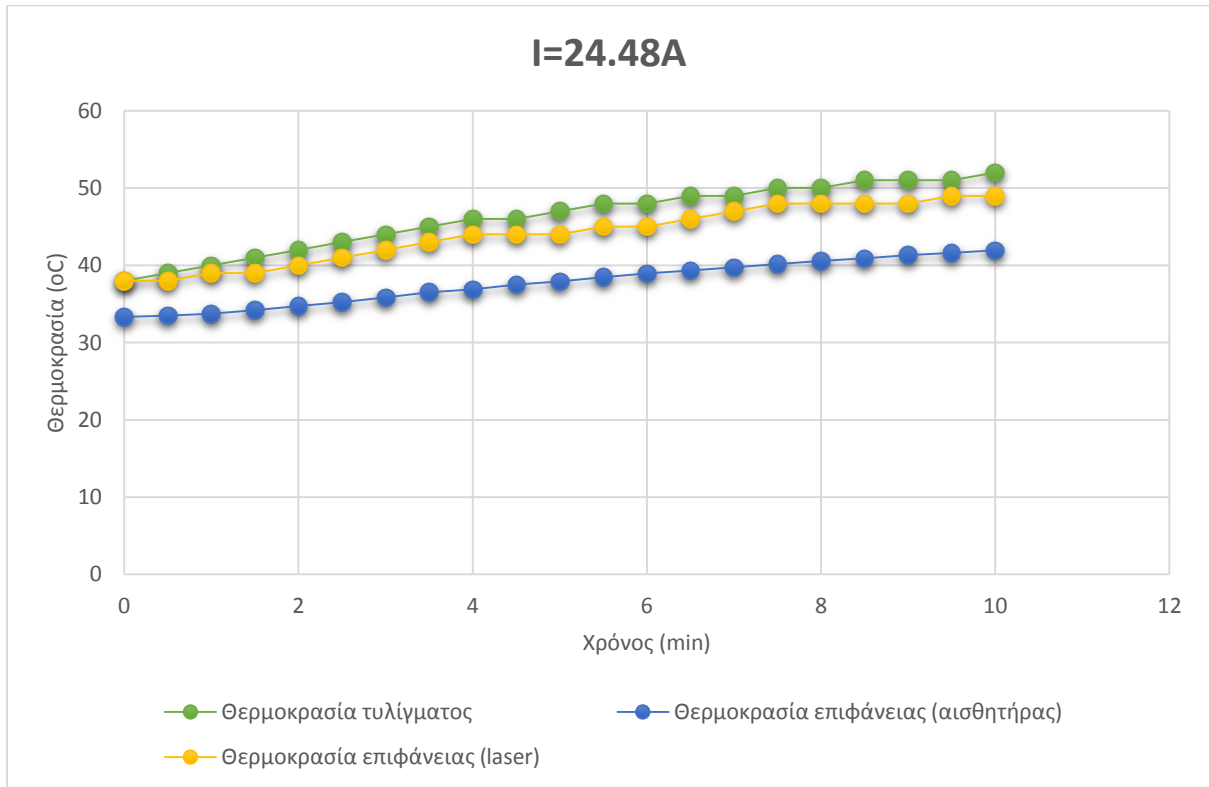


Σχήμα 5.12: Μετρήσεις θερμοκρασίας για γεννήτρια 5 kW με ανοιχτούς αεραγωγούς.

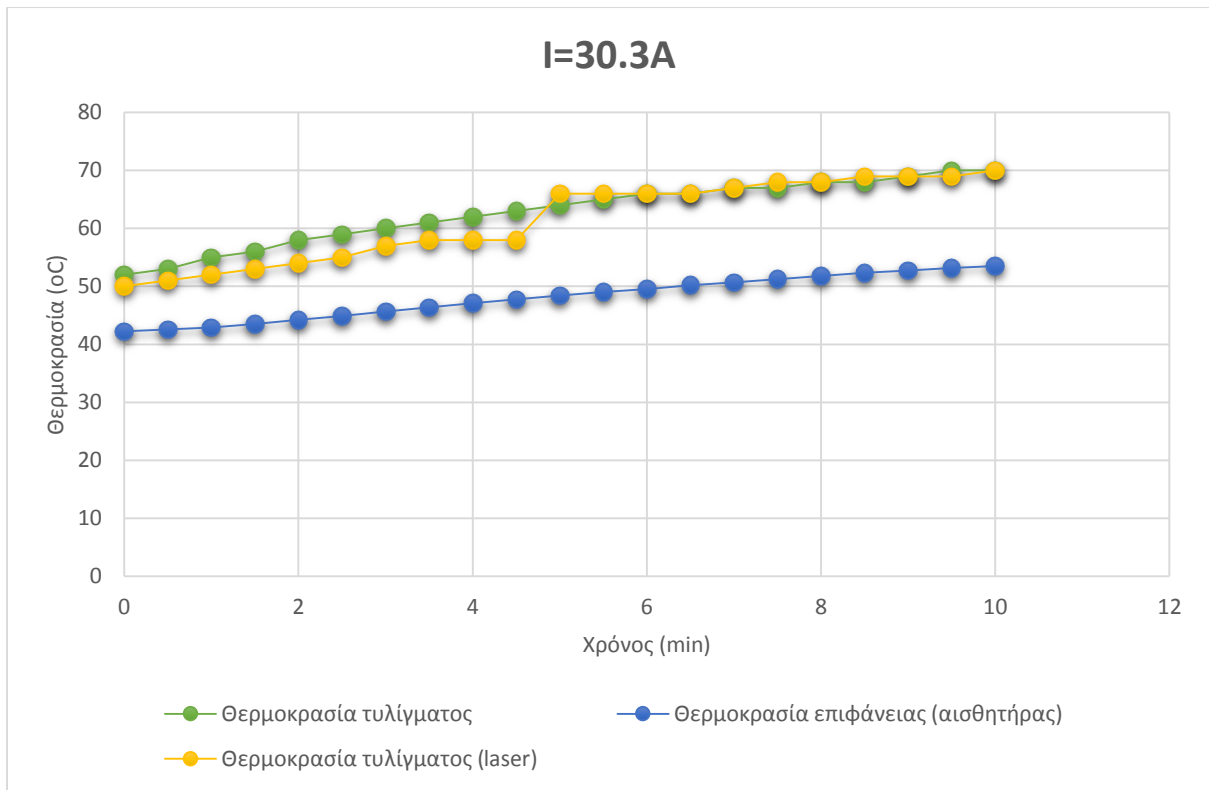
Παρατηρώντας το γράφημα βλέπουμε ότι για κάθε ρεύμα λειτουργίας, η θερμοκρασία που δείχνει κάθε αισθητήρας φαίνεται να σταθεροποιείται. Αυτό προκύπτει από τα μικρά «σκαλοπάτια» που δημιουργούνται στις καμπύλες των θερμοκρασιών. Παράλληλα, είναι εμφανές ότι η θερμοκρασία που δείχνει ο αισθητήρας επιφάνειας είναι σημαντικά επηρεασμένη από τη ροή του αέρα που προκύπτει από την κίνηση του δρομέα, σε αντίθεση με τη μέτρηση του θερμομέτρου, η οποία, παρόλο που είναι ελλιπής στην ακρίβειά της, προσεγγίζει αρκετά καλά τη μέτρηση του αισθητήρα του τυλίγματος. Για να εξακριβωθούν οι παρατηρήσεις αυτές, παρατίθενται τα ακόλουθα γραφήματα για κάθε ρεύμα ξεχωριστά, ξεκινώντας από τα 18.27 A.



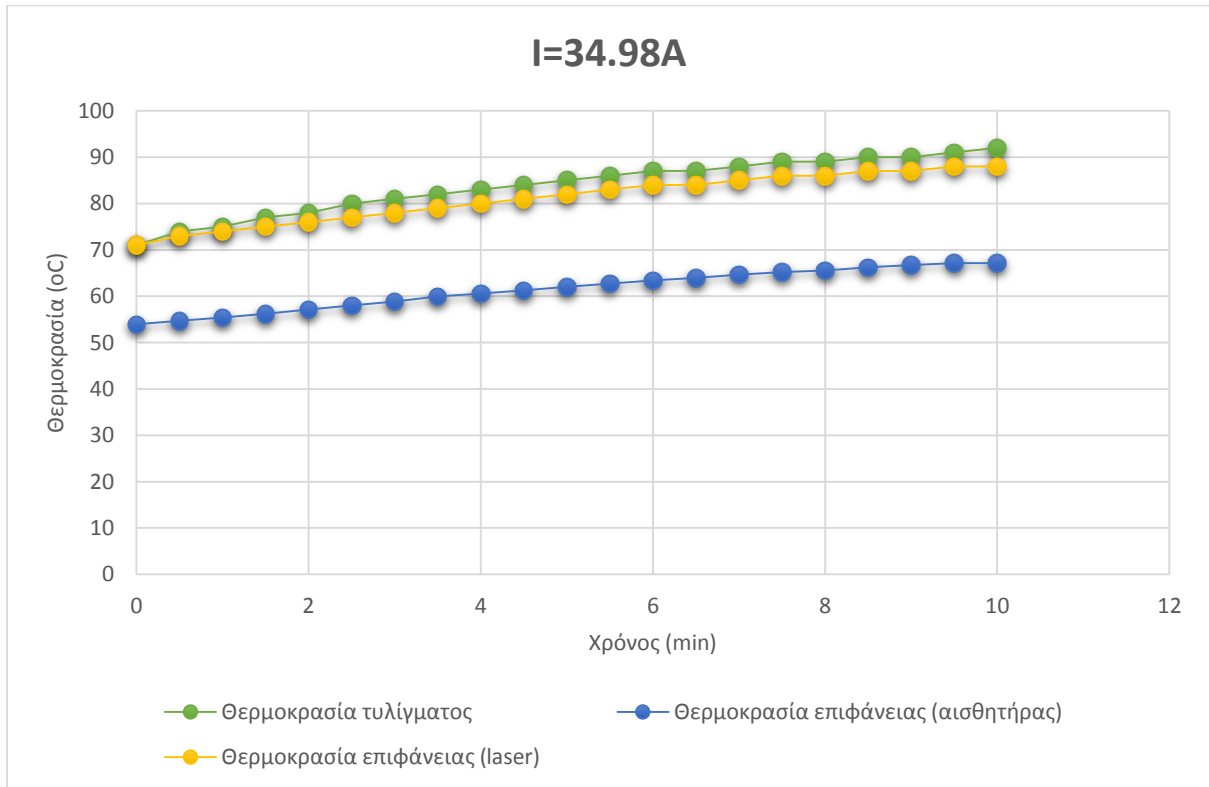
Σχήμα 5.13: Μετρήσεις θερμοκρασίας για ρεύμα 18.27 A.



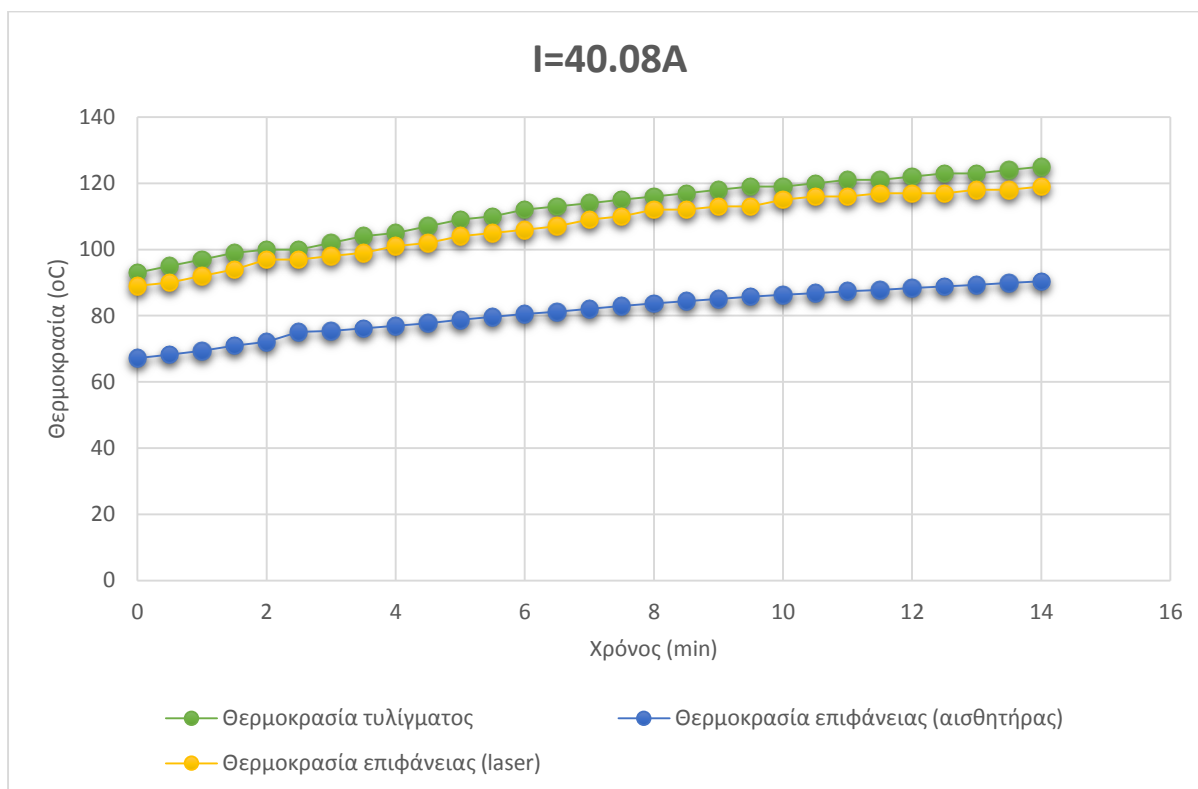
Σχήμα 5.14: Μετρήσεις θερμοκρασίας για ρεύμα 24.48 A.



Σχήμα 5.15: Μετρήσεις θερμοκρασίας για ρεύμα 30.3 A.



Σχήμα 5.16: Μετρήσεις θερμοκρασίας για ρεύμα 34.98 A.



Σχήμα 5.17: Μετρήσεις θερμοκρασίας για ρεύμα 40.08 A.

Στον Πίνακα 5.9 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές του ρεύματος, της τάσης, της ροπής, της ταχύτητας περιστροφής, της ηλεκτρικής και μηχανικής ισχύος, καθώς και ο βαθμός απόδοσης για κάθε ρεύμα λειτουργίας, που προέκυψαν από τις μετρήσεις του παλμογράφου:

Ρεύμα (A)	Τάση (V)	Ροπή (Nm)	Ταχύτητα περιστροφής (RPM)	PeI (W)	Pmech (W)	Βαθμός απόδοσης (%)
1.41	20.835	14.45140154	90	88.246	136.252	64.76669
5.94	21.88273116	43.00363928	97.53324983	389.725744	439.151	88.74523
10.92	22.69856212	74.89379264	105.519761	743.4383167	827.383	89.85421
18.27	24.0272206	120.6451147	116.0964921	1316.740382	1466.467	89.78997
24.48	24.9972683	158.6707586	125.8878131	1835.845296	2091.339	87.78325
30.3	25.91114255	193.1245906	136.8071057	2355.01871	2766.315	85.13198
34.98	26.73414108	219.6272352	148	2805.395776	3403.267	82.43243
40.08	27.10781648	244.7381059	160	3259.334942	4099.833	79.49922

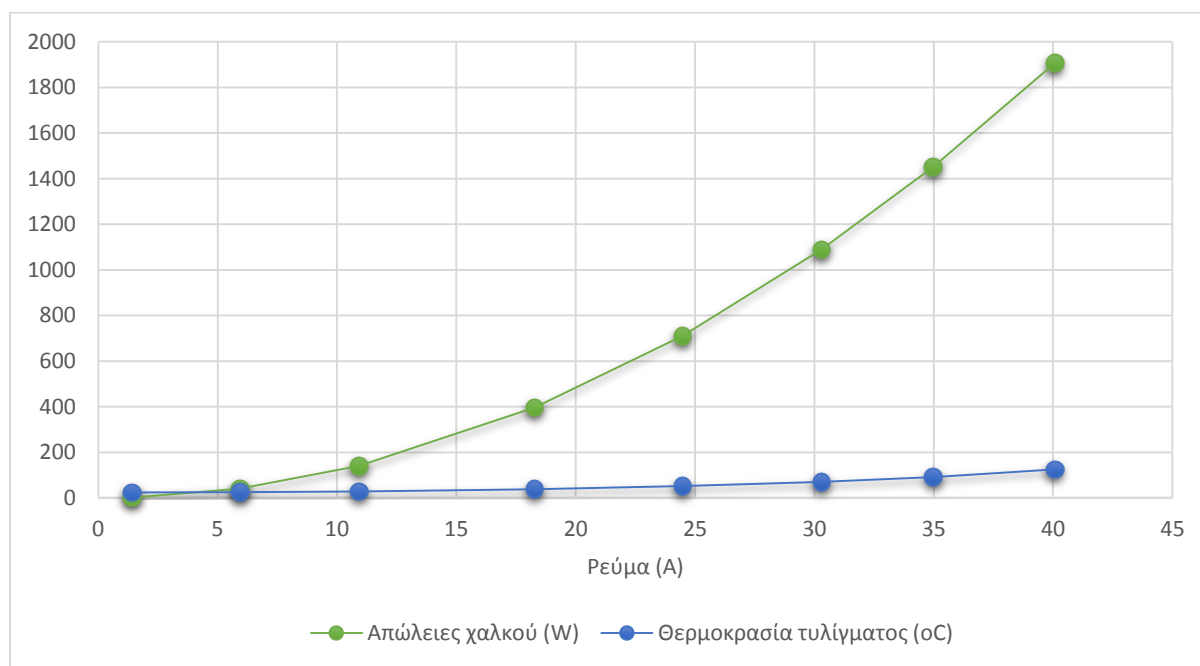
Πίνακας 5.9: Μέσες τιμές μετρούμενων μεγεθών.

Αντίστοιχα, η τελική θερμοκρασία του τυλίγματος και οι απώλειες χαλκού για κάθε ρεύμα είναι:

Ρεύμα (A)	Θερμοκρασία τυλίγματος (oC)	Απώλειες χαλκού (W)
1.41	24	2.365199
5.94	26	41.82151
10.92	29	141.4418
18.27	38	395.9841
24.48	52	711.167
30.3	70	1089.181
34.98	92	1451.912
40.08	125	1906.134

Πίνακας 5.10: Τελική θερμοκρασία στάτη και απώλειες χαλκού για κάθε ρεύμα λειτουργίας.

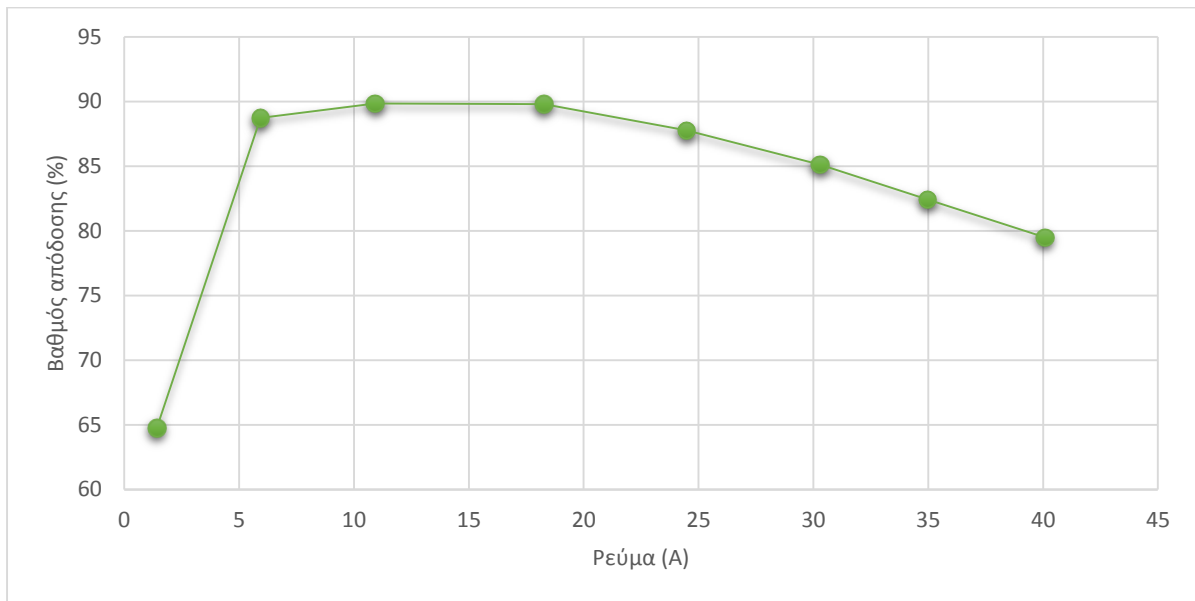
Με βάση τα δεδομένα των προηγούμενων πινάκων, προκύπτουν οι γραφικές παραστάσεις των απωλειών χαλκού και της θερμοκρασίας του τυλίγματος συναρτήσει του ρεύματος:



Σχήμα 5.18: Θερμοκρασία στάτη και απώλειες χαλκού συναρτήσει του ρεύματος.

Από τα παραπάνω γραφήματα φαίνεται η εξάρτηση των απωλειών του χαλκού από το τετράγωνο του ρεύματος, καθώς βλέπουμε ότι όσο αυξάνεται το ρεύμα, οι απώλειες αυξάνονται με ακόμα μεγαλύτερο ρυθμό. Και η θερμοκρασία του τυλίγματος, ακολουθεί μια τέτοια τάση, αν και δεν φαίνεται καθαρά σε αυτό το γράφημα λόγω της κλίμακας του κάθετου άξονα.

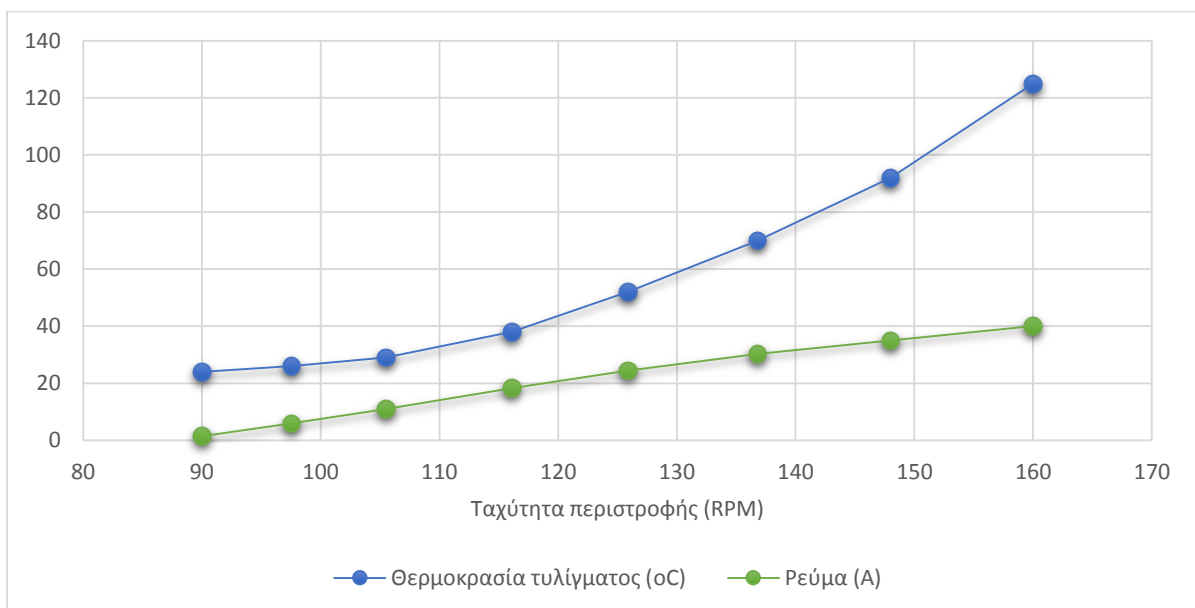
Ακολουθεί η γραφική παράσταση του βαθμού απόδοσης συναρτήσει του ρεύματος:



Σχήμα 5.19: Βαθμός απόδοσης συναρτήσει του ρεύματος.

Παρατηρείται πως ο βαθμός απόδοσης από τη στιγμή που η γεννήτρια θα ξεκινήσει να δουλεύει στις ονομαστικές τιμές της, θα μειώνεται με την αύξηση του ρεύματος. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στην αύξηση των απωλειών συγκριτικά με την ισχύ εξόδου, καθώς και στην αύξηση της αντίστασης λόγω της θερμοκρασίας.

Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζονται η θερμοκρασία του τυλίγματος και το ρεύμα συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής:

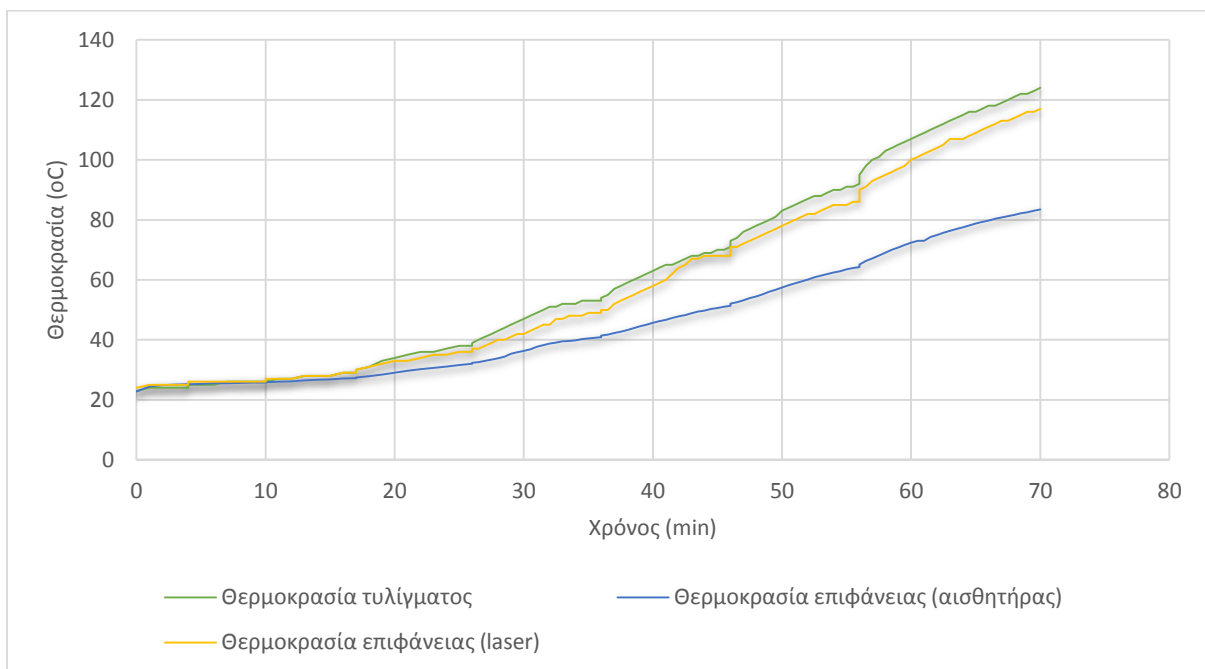


Σχήμα 5.20: Θερμοκρασία στάτη και ρεύμα συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής.

Βλέπουμε πως αυξάνοντας τις στροφές της γεννήτριας αυξάνεται και το ρεύμα λειτουργίας της, ενώ αντίστοιχη είναι και η συμπεριφορά της θερμοκρασίας του τυλίγματος.

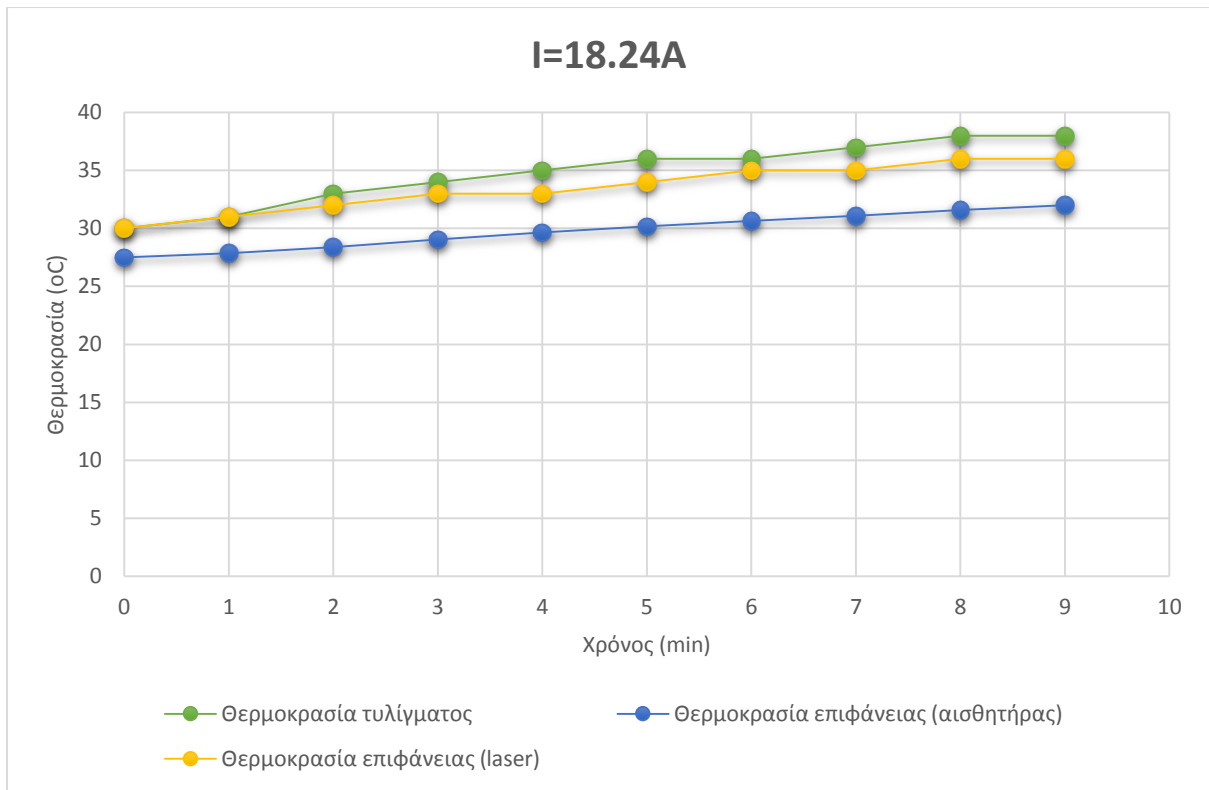
Με κλειστούς αεραγωγούς

Στο πείραμα αυτό ακολουθείται η ίδια ακριβώς διαδικασία με το προηγούμενο, μόνο που αυτή τη φορά οι αεραγωγοί του δίσκου του δρομέα είναι καλυμμένοι, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.6. Με βάση τις μετρήσεις που έδωσαν οι δύο αισθητήρες θερμοκρασίας και το θερμόμετρο, προκύπτει το ακόλουθο γράφημα:

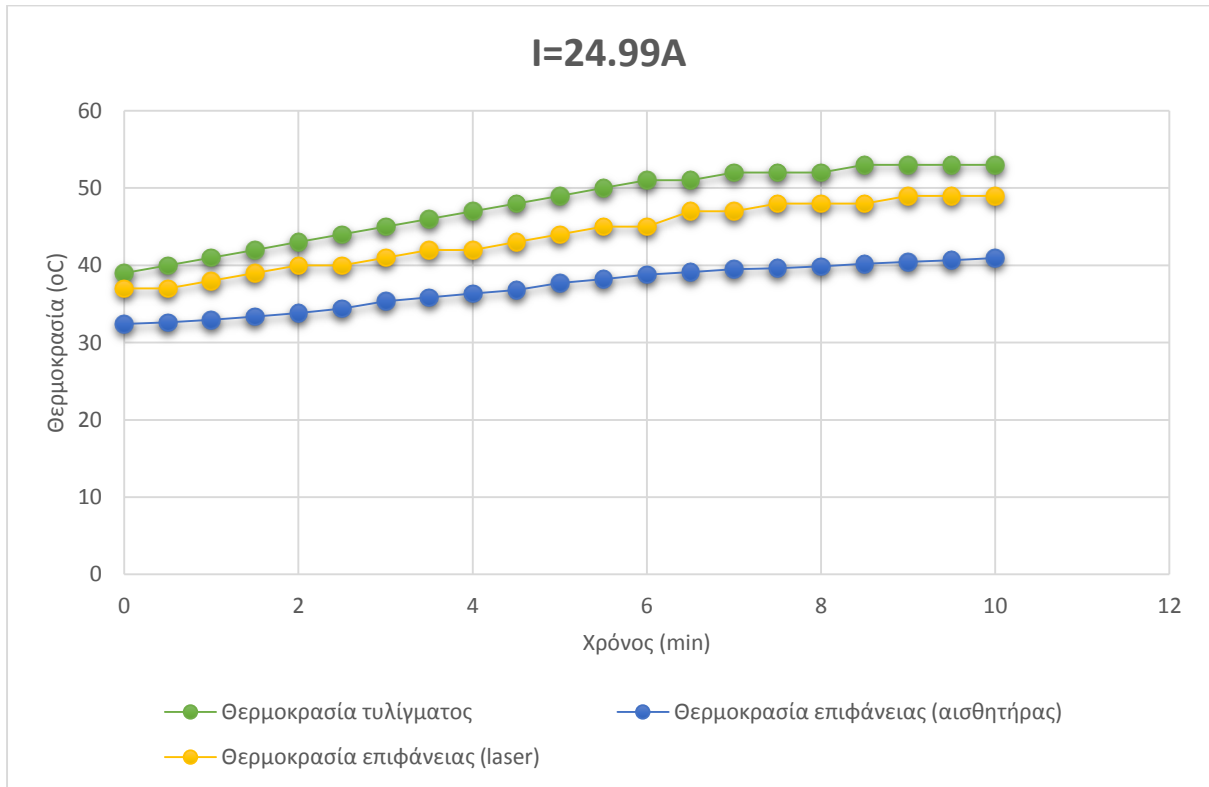


Σχήμα 5.21: Μετρήσεις θερμοκρασίας για γεννήτρια 5 kW με κλειστούς αεραγωγούς.

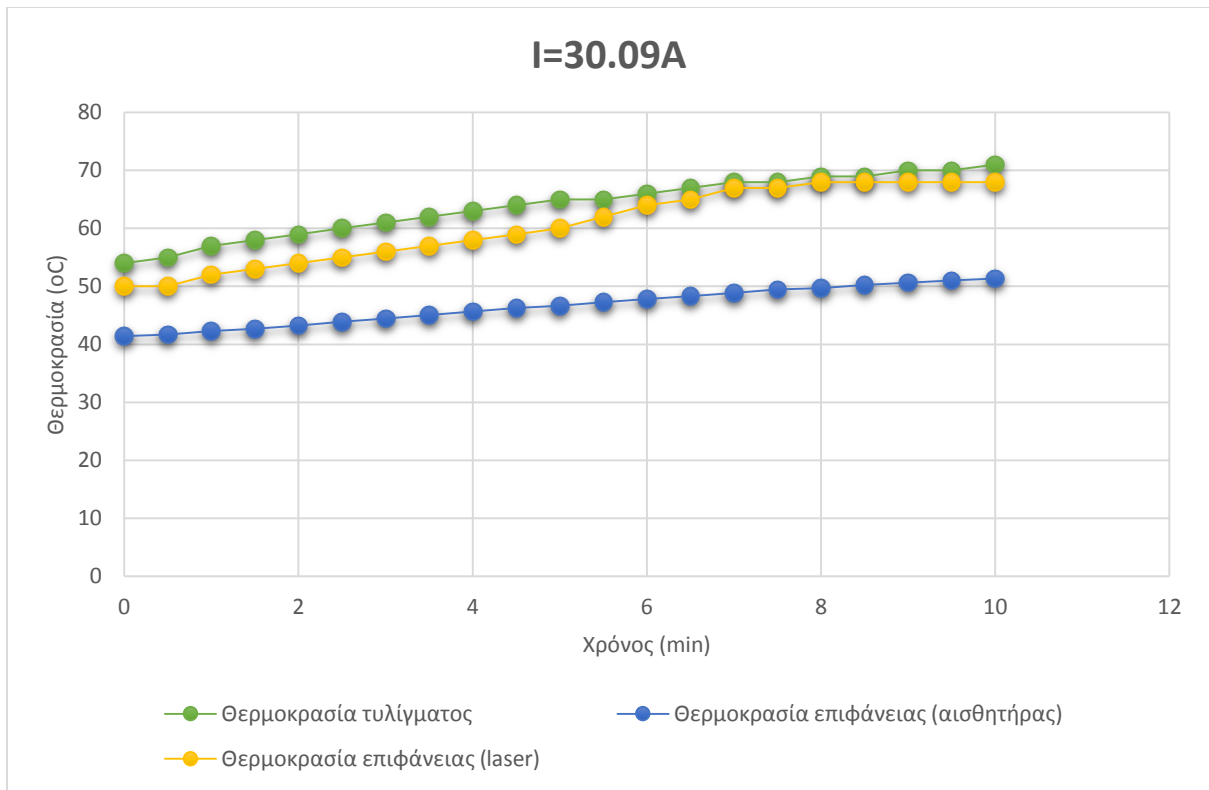
Για το πείραμα αυτό προκύπτουν τα ίδια συμπεράσματα με προηγούμενως. Εδώ μάλιστα φαίνεται ακόμα πιο έντονα η σταθεροποίηση της θερμοκρασίας για κάθε ρεύμα, ειδικά στο τύλιγμα του χαλκού. Παρακάτω θα παρουσιαστούν οι γραφικές παραστάσεις της θερμοκρασίας για τα ρεύματα εκείνα που υπάρχουν αρκετές μετρήσεις, ώστε να φανεί η συμπεριφορά αυτή:



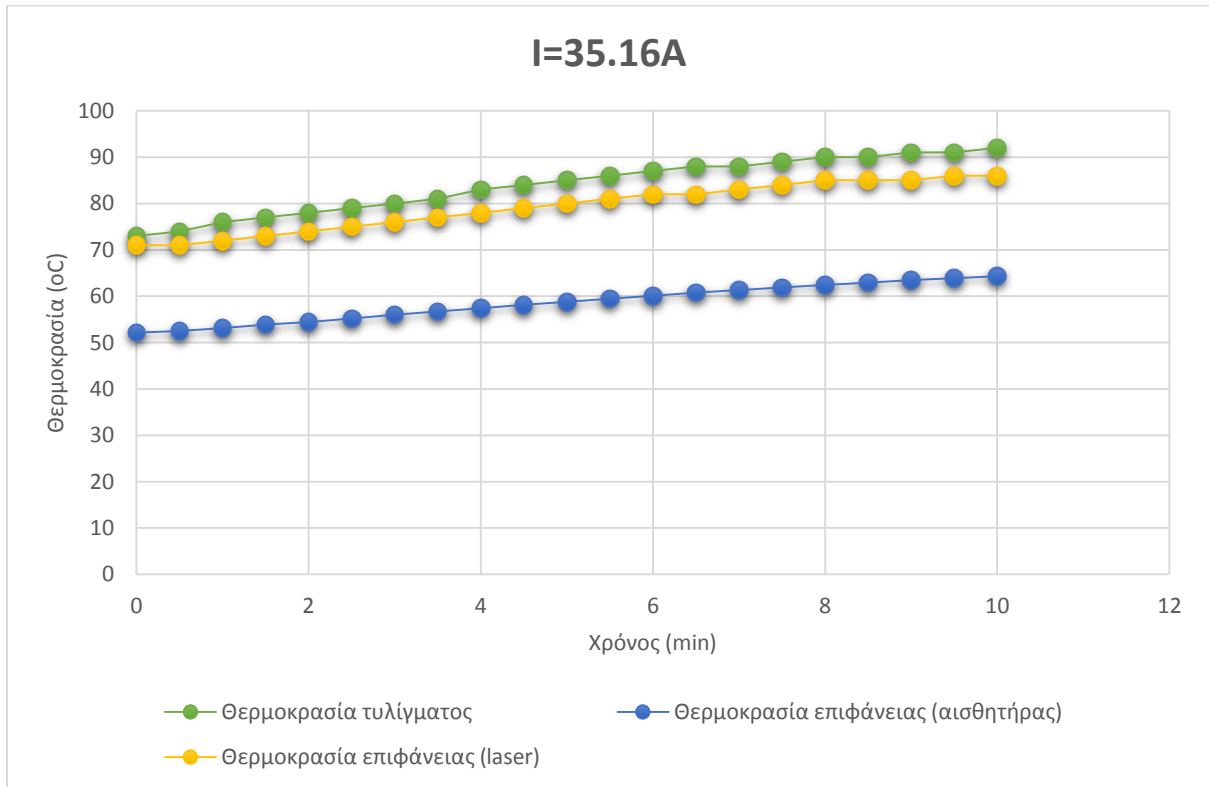
Σχήμα 5.22: Μετρήσεις θερμοκρασίας για ρεύμα 18.24 A.



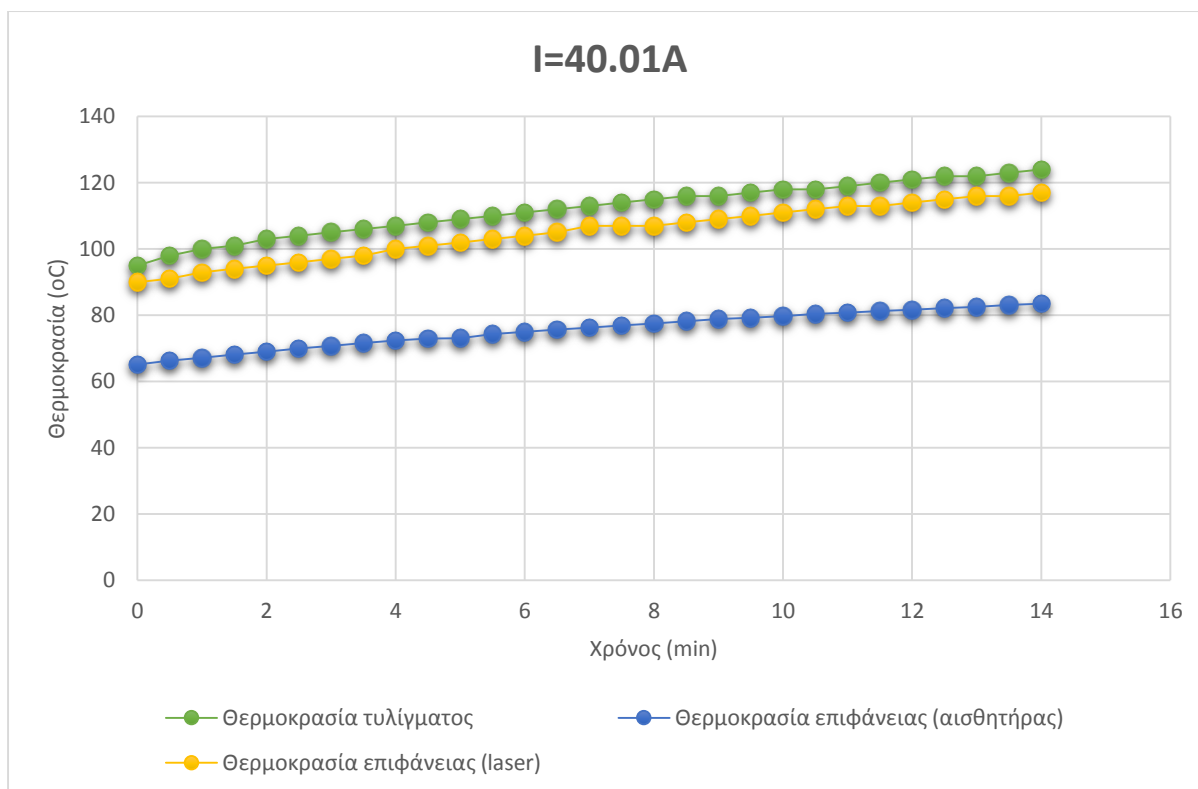
Σχήμα 5.23: Μετρήσεις θερμοκρασίας για ρεύμα 24.99 A.



Σχήμα 5.24: Μετρήσεις θερμοκρασίας για ρεύμα 30.09 A.

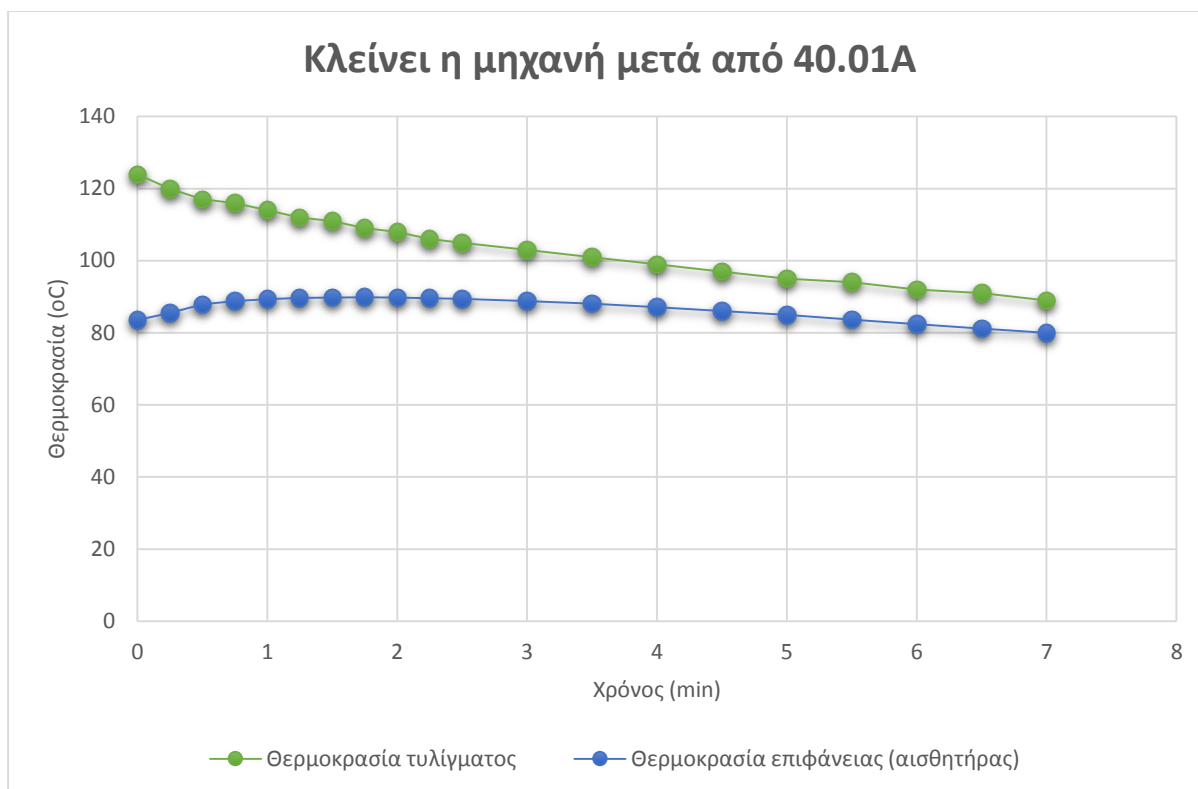


Σχήμα 5.25: Μετρήσεις θερμοκρασίας για ρεύμα 35.16 A.



Σχήμα 5.26: Μετρήσεις θερμοκρασίας για ρεύμα 40.01 A.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, υπάρχει μια σημαντική απόκλιση των μετρήσεων που δίνει ο αισθητήρας στην επιφάνεια του στάτη, σε σύγκριση με τις δύο άλλες μεθόδους μέτρησης. Το φαινόμενο αυτό, όπως έχει ήδη εξηγηθεί, οφείλεται στην ψύξη του αισθητήρα θερμοκρασίας που έχει τοποθετηθεί στην επιφάνεια του στάτη λόγω της ροής αέρα από την περιστροφή του δρομέα. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει από μια διαπίστωση που έγινε όταν σταμάτησε να περιστρέφεται η γεννήτρια. Αυτό που έχει ενδιαφέρον είναι ότι, ενώ η θερμοκρασία του τυλίγματος αρχίζει να πέφτει αμέσως μόλις κλείσουμε τη γεννήτρια, η θερμοκρασία στην επιφάνεια του στάτη συνεχίζει να αυξάνεται για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, προτού αρχίσει κι αυτή να μειώνεται, έως ότου τείνουν να αποκτήσουν την ίδια τιμή. Η συμπεριφορά αυτή φαίνεται και σχηματικά στο ακόλουθο γράφημα:



Σχήμα 5.27: Μετρήσεις θερμοκρασίας μετά το κλείσιμο της γεννήτριας.

Οι μέσες τιμές του ρεύματος, της τάσης, της ροπής, της ταχύτητας περιστροφής, της ηλεκτρικής και μηχανικής ισχύος, καθώς και ο βαθμός απόδοσης για κάθε ρεύμα λειτουργίας, όπως αυτές μετρήθηκαν από τον παλμογράφο και το ροπόμετρο, έχουν ως εξής:

Ρεύμα (A)	Τάση (V)	Ροπή (Nm)	Ταχύτητα περιστροφής (RPM)	PeI (W)	Pmech (W)	Βαθμός απόδοσης (%)
1.59	21.124	14.033	90.998	100.601	133.709	75.239
6.02	21.973	42.029	97.476	396.951	429.005	92.528
10.41	22.702	70.814	104.587	708.889	775.444	91.417
18.24	23.944	119.314	115.236	1309.889	1439.484	90.997
24.99	24.995	160.88	126.035	1873.847	2123.011	88.264
30.09	25.884	190.957	136.291	2336.862	2724.857	85.761
35.16	26.47	220.223	146.226	2792.026	3371.524	82.812
40.01	27.583	245.97	161.814	3311.058	4167.346	79.452

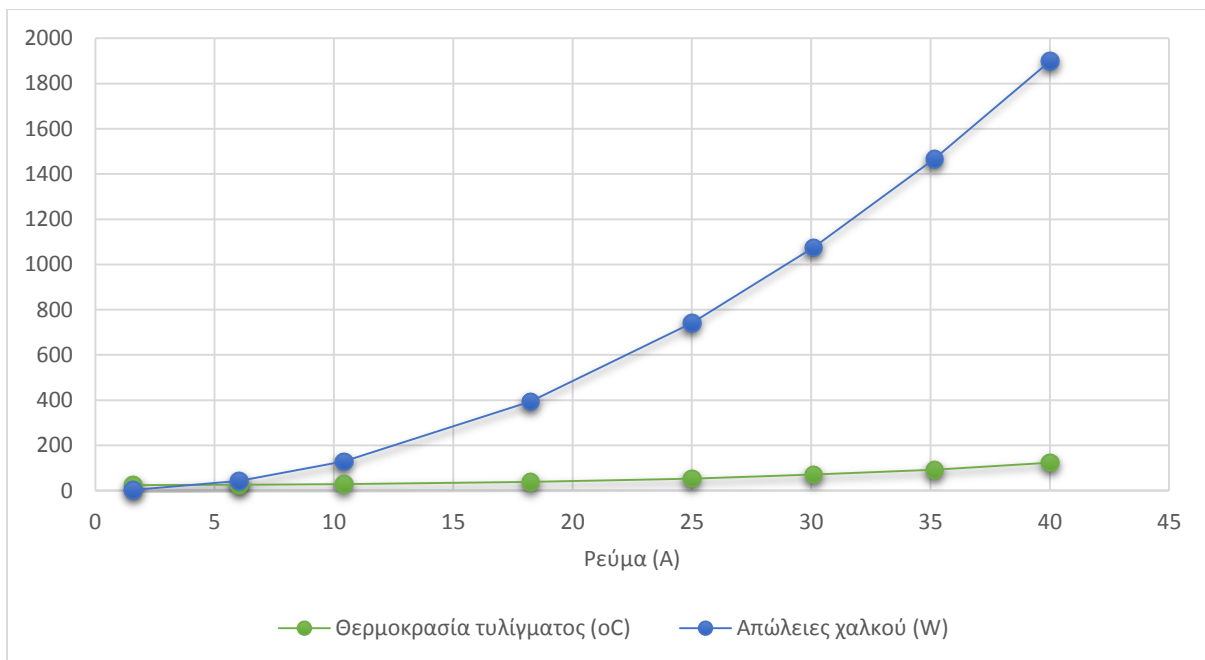
Πίνακας 5.11: Μέσες τιμές μετρούμενων μεγεθών.

Η τελική θερμοκρασία του τυλίγματος για κάθε ρεύμα και οι αντίστοιχες απώλειες χαλκού είναι:

Ρεύμα (A)	Θερμοκρασία τυλίγματος (οC)	Απώλειες χαλκού (W)
1.59	24	2.99
6.02	26	43.032
10.41	29	128.558
18.24	38	394.587
24.99	53	741.047
30.09	71	1074.724
35.16	92	1466.929
40.01	124	1899.91

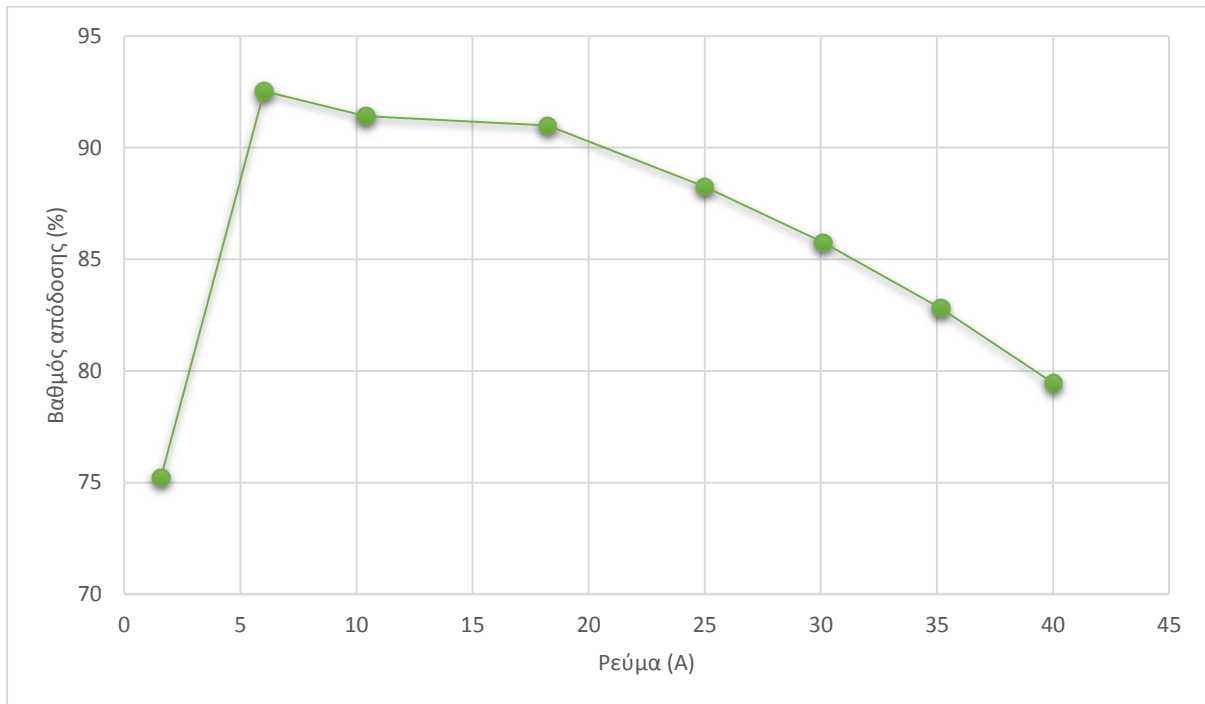
Πίνακας 5.12: Τελική θερμοκρασία στάτη και απώλειες χαλκού για κάθε ρεύμα λειτουργίας.

Από τον Πίνακα 5.11 προκύπτει η γραφική παράσταση της θερμοκρασίας του τυλίγματος και των απωλειών του χαλκού συναρτήσει του ρεύματος λειτουργίας:



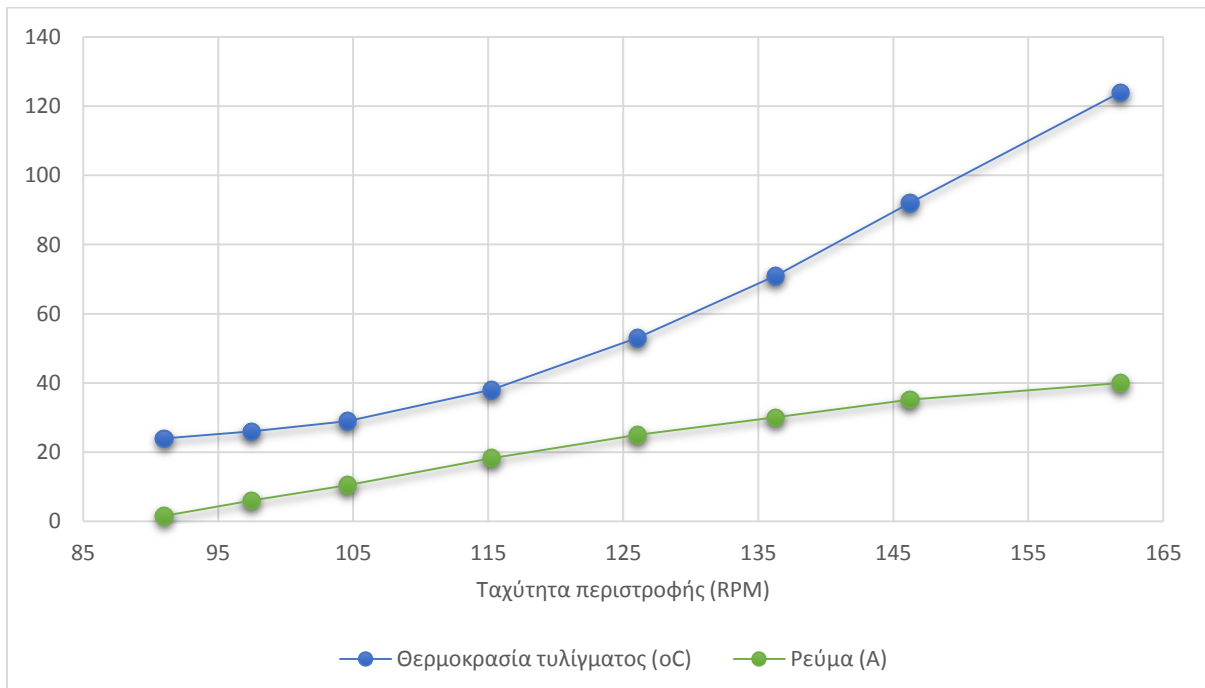
Σχήμα 5.28: Θερμοκρασία στάτη και απώλειες χαλκού συναρτήσει του ρεύματος.

Αντίστοιχα, η γραφική παράσταση του βαθμού απόδοσης σε σχέση με το ρεύμα λειτουργίας είναι:



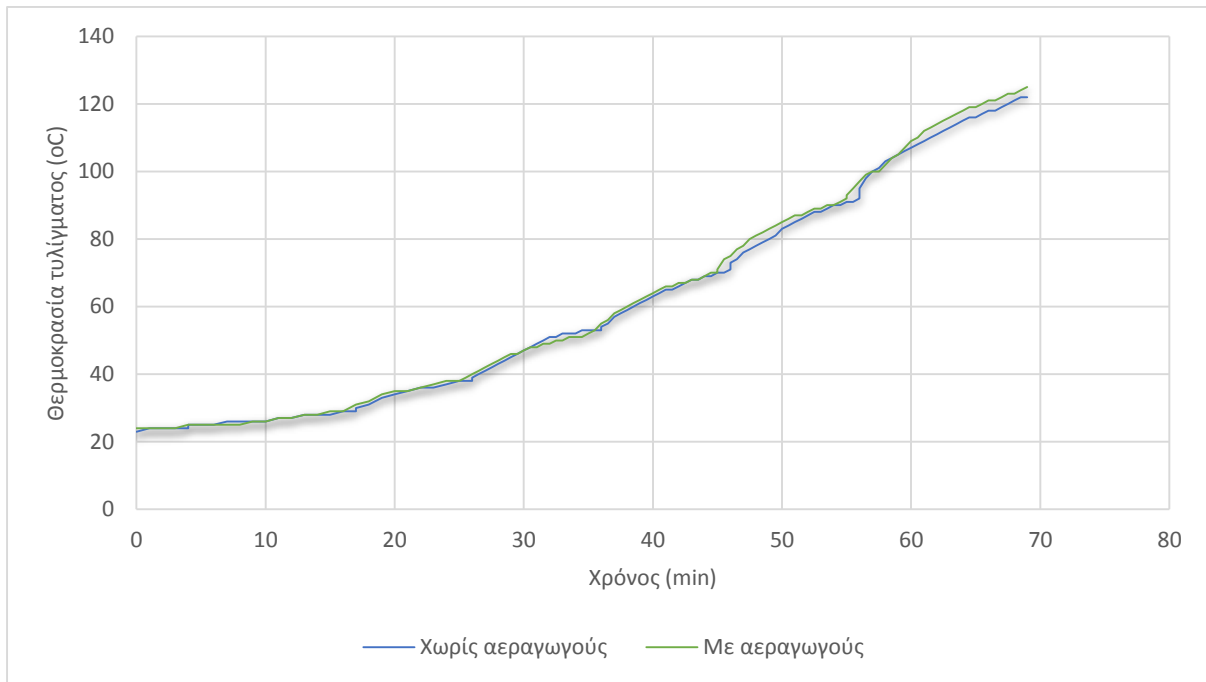
Σχήμα 5.29: Βαθμός απόδοσης συναρτήσει του ρεύματος.

Τέλος, η θερμοκρασία τυλίγματος και το ρεύμα συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής ακολουθούν την ακόλουθη μορφή:

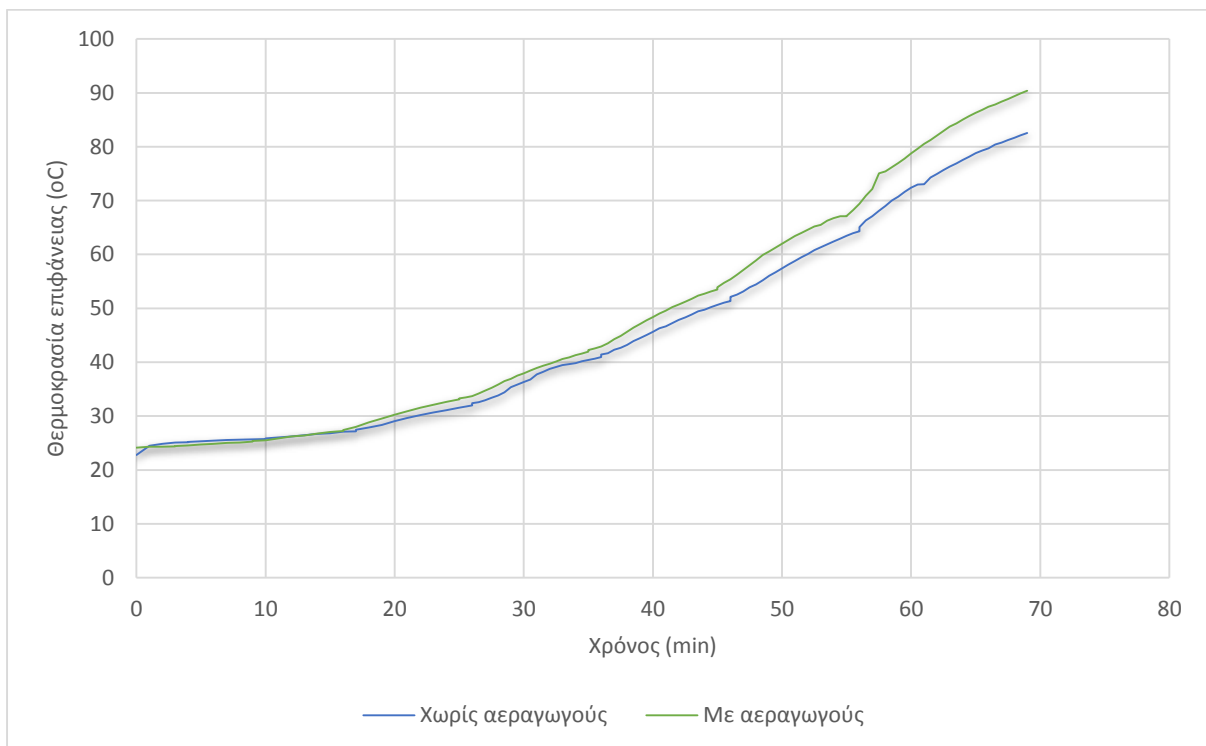


Σχήμα 5.30: Θερμοκρασία στάτη και ρεύμα συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής.

Προκειμένου να συγκρίνουμε τα δύο αυτά πειράματα, με ανοιχτούς και κλειστούς αεραγωγούς στους δίσκους του δρομέα, παρουσιάζονται τα δύο ακόλουθα γραφήματα για τη θερμοκρασία τυλίγματος και τη θερμοκρασία επιφάνειας του στάτη στα δύο πειράματα:



Σχήμα 5.31: Σύγκριση θερμοκρασιών τυλίγματος για γεννήτρια 5 kW με και χωρίς αεραγωγούς.



Σχήμα 5.32: Σύγκριση θερμοκρασιών επιφάνειας στάτη για γεννήτρια 5 kW με και χωρίς αεραγωγούς.

Η θερμοκρασία στην επιφάνεια του στάτη παρουσιάζει μία σημαντική πτώση, γύρω στους 10 °C, όπως βλέπουμε από το Σχήμα 5.32. Συμπεραίνουμε ότι το κλείσιμο των αεραγωγών εμποδίζει τον αέρα να περάσει μέσα από τους δίσκους και τον ωθεί προς την περιφέρεια της γεννήτριας. Αυτή η αυξημένη ροή αέρα που προκύπτει μέσω του διακένου ψύχει ακόμα περισσότερο τον αισθητήρα θερμότητας της επιφάνειας, όπως φαίνεται και στο γράφημα. Επομένως, καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως οι αεραγωγοί των δρομέων, πέρα από συγκεκριμένα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά που προσδίδουν στη γεννήτρια, συμβάλλουν και στην ψύξη των δρομέων, επιτρέποντας τον αέρα να περνά μέσω αυτών. Οι αεραγωγοί του δρομέα δε δείχνουν να συμβάλλουν στην ψύξη των τυλιγμάτων του χαλκού, διότι η διαφορά μεταξύ των δύο πειραμάτων είναι πολύ μικρή, όπως παρατηρούμε στο Σχήμα 5.31. Καθώς τα πηνία δεν έρχονται σε άμεση επαφή με τον αέρα, για να επιδράσει σε αυτά η ροή του, μένει να εξεταστεί αν η όποια επίδραση του αέρα περνά μέσα από τη ρητίνη ή όχι.

Στο σημείο αυτό, ανοίγουμε και πάλι τους αεραγωγούς και καλύπτουμε τον αισθητήρα θερμοκρασίας στην επιφάνεια του στάτη με σιλικόνη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.7(β). Το πείραμα αυτό εκτελείται για δύο διαφορετικά ρεύματα λειτουργίας, τα 40.84 A και τα 58.16 A.

Για ρεύμα λειτουργίας $I=40.84$ A

Κατά τη γνωστή διαδικασία υπολογίζουμε τις μέσες τιμές των μεγεθών που μας ενδιαφέρουν, όπως αυτές προκύπτουν από τις μετρήσεις του παλμογράφου:

Ρεύμα (A)	Τάση (V)	Ροπή (Nm)	Ταχύτητα περιστροφής (RPM)	P_{el} (W)	P_{mech} (W)	Βαθμός απόδοσης (%)
40.84	27.76	257.194	163.124	3401.457	4392.635	77.435

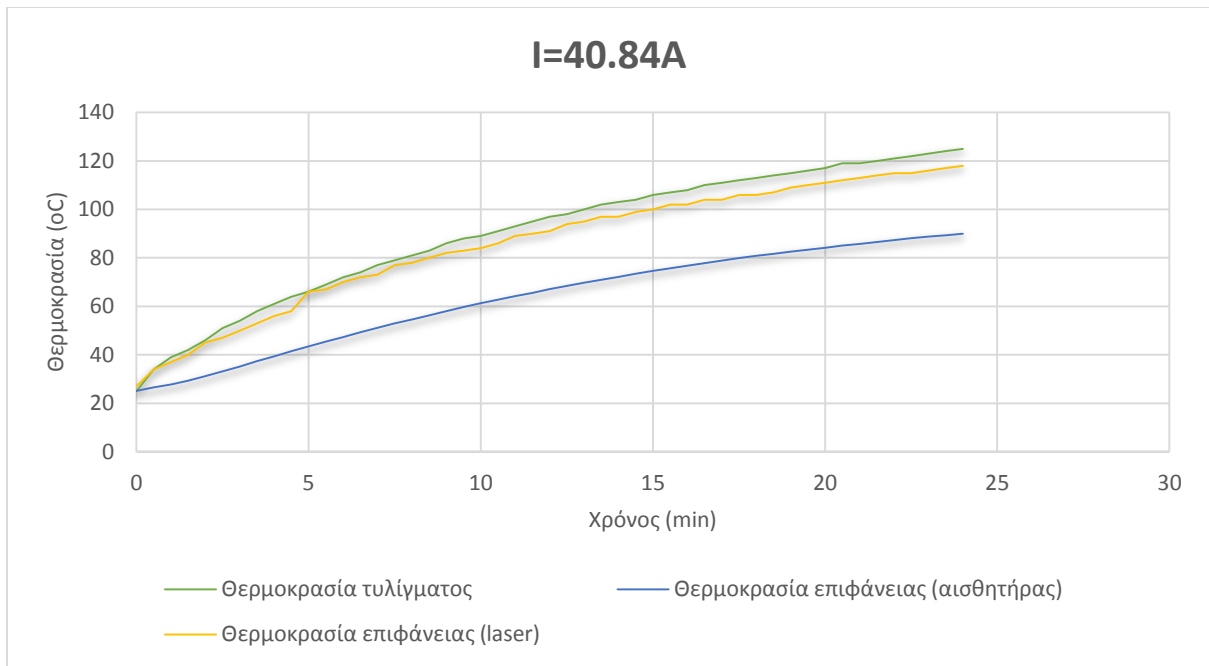
Πίνακας 5.13: Μέσες τιμές μετρούμενων μεγεθών.

Η τελική θερμοκρασία του τυλίγματος και οι απώλειες του χαλκού συναρτήσει του ρεύματος είναι:

Ρεύμα (A)	Θερμοκρασία τυλίγματος (°C)	Απώλειες χαλκού (W)
40.84	125	1979.573

Πίνακας 5.14: Τελική θερμοκρασία στάτη και απώλειες χαλκού.

Ο χρόνος εκτέλεσης του πειράματος είναι τα 24 λεπτά, με δειγματοληψία κάθε 30 δευτερόλεπτα. Παρακάτω παρουσιάζονται οι μετρήσεις που ελήφθησαν με τους τρεις τρόπους μέτρησης:



Σχήμα 5.33: Μετρήσεις θερμοκρασίας για ρεύμα λειτουργίας 40.84 A.

Παρατηρείται η σταδιακή σταθεροποίηση των θερμοκρασιών για κάθε μέθοδο μέτρησης.

Για ρεύμα λειτουργίας I=58.16 A

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις έχουμε τον παρακάτω πίνακα για τα διάφορα μετρούμενα μεγέθη:

Ρεύμα (A)	Τάση (V)	Ροπή (Nm)	Ταχύτητα περιστροφής (RPM)	PeI (W)	Pmech (W)	Βαθμός απόδοσης (%)
58.16	28.144	358.278	186.243	4910.582	6985.99	70.292

Πίνακας 5.15: Μέσες τιμές μετρούμενων μεγεθών.

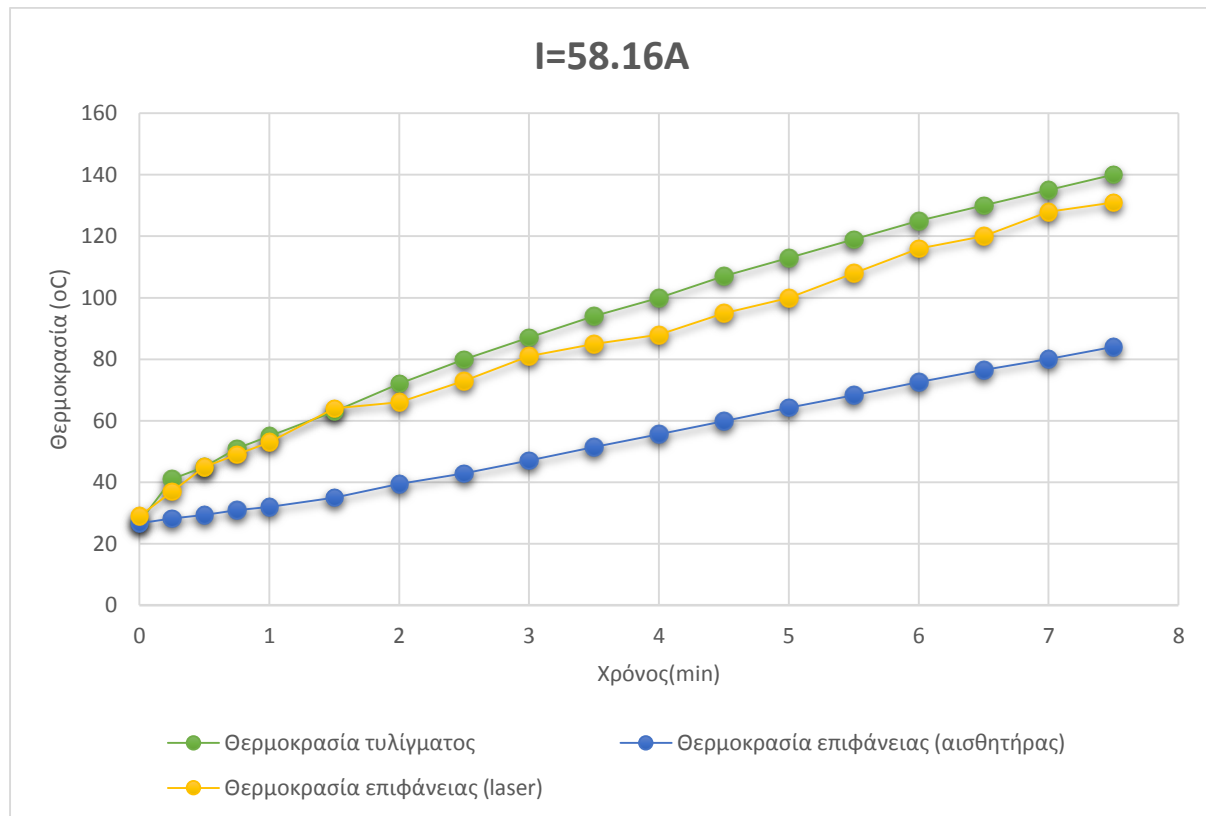
Η τελική θερμοκρασία του τυλίγματος για κάθε ρεύμα και οι αντίστοιχες απώλειες χαλκού είναι:

Ρεύμα (A)	Θερμοκρασία τυλίγματος (°C)	Απώλειες χαλκού (W)
58.16	140	4014.073

Πίνακας 5.16: Τελική θερμοκρασία στάτη και απώλειες χαλκού.

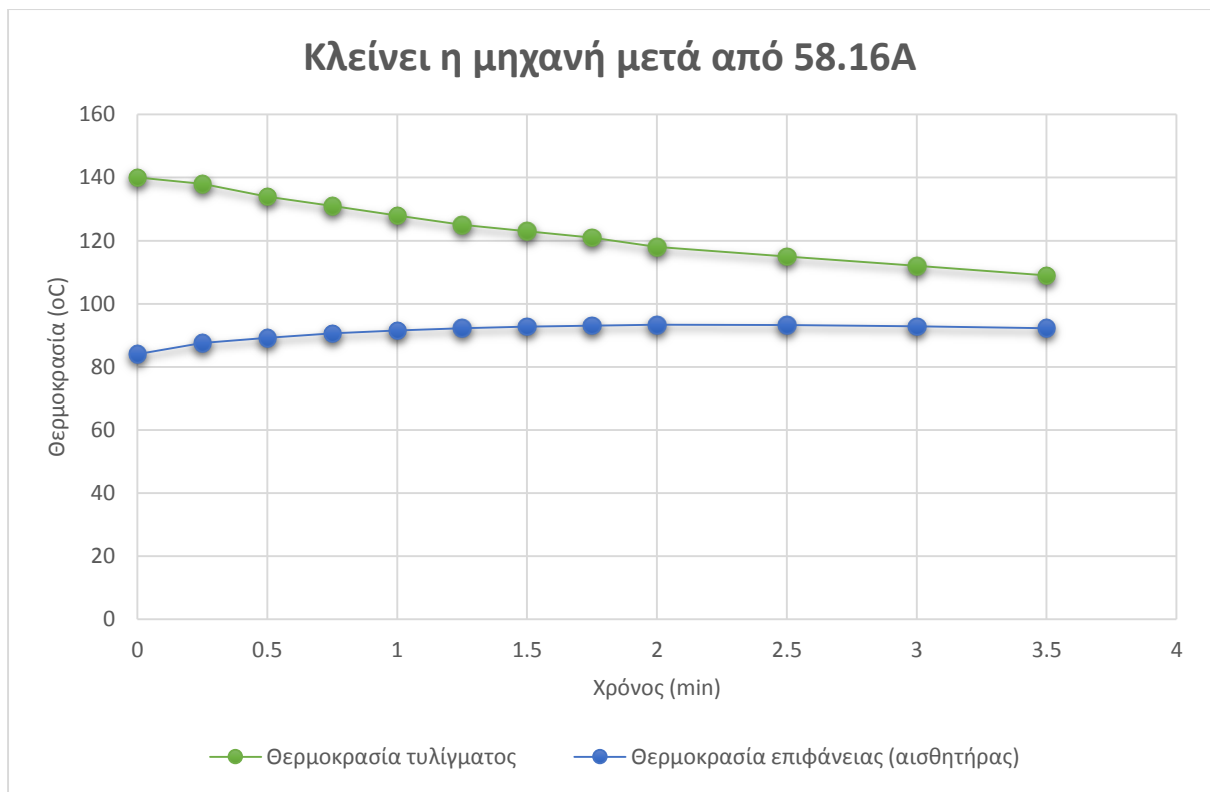
Παρατηρείται πως οι απώλειες του χαλκού έχουν αυξηθεί σημαντικά, εξαιτίας της μεγάλης αύξησης του ρεύματος, με συνέπεια να μειώνεται αισθητά ο βαθμός απόδοσης της μηχανής.

Το πείραμα διήρκεσε μόλις 7.5 λεπτά για λόγους ασφαλείας, καθώς παρατηρήθηκε ραγδαία αύξηση της θερμοκρασίας του στάτη και δεν θέλαμε να τεθεί σε κίνδυνο η αντοχή των μονώσεων του χαλκού. Με δειγματοληψία αρχικά κάθε 15 δευτερόλεπτα και έπειτα κάθε μισό λεπτό, προέκυψε το Σχήμα 5.34:



Σχήμα 5.34: Μετρήσεις θερμοκρασίας για ρεύμα λειτουργίας 58.16 A.

Όπως και στην περίπτωση των κλειστών αεραγωγών, μετρήσαμε τις θερμοκρασίες στο τύλιγμα και στην επιφάνεια και μετά το κλείσιμο της γεννήτριας και καταλήξαμε στο ίδιο συμπέρασμα, ότι δηλαδή η θερμοκρασία του αισθητήρα στην επιφάνεια του στάτη επηρεάζεται σημαντικά από τη ροή του αέρα. Συγκεκριμένα, προέκυψε το Σχήμα 5.35, όπου είναι εμφανής η τάση των θερμοκρασιών να συγκλίνουν:



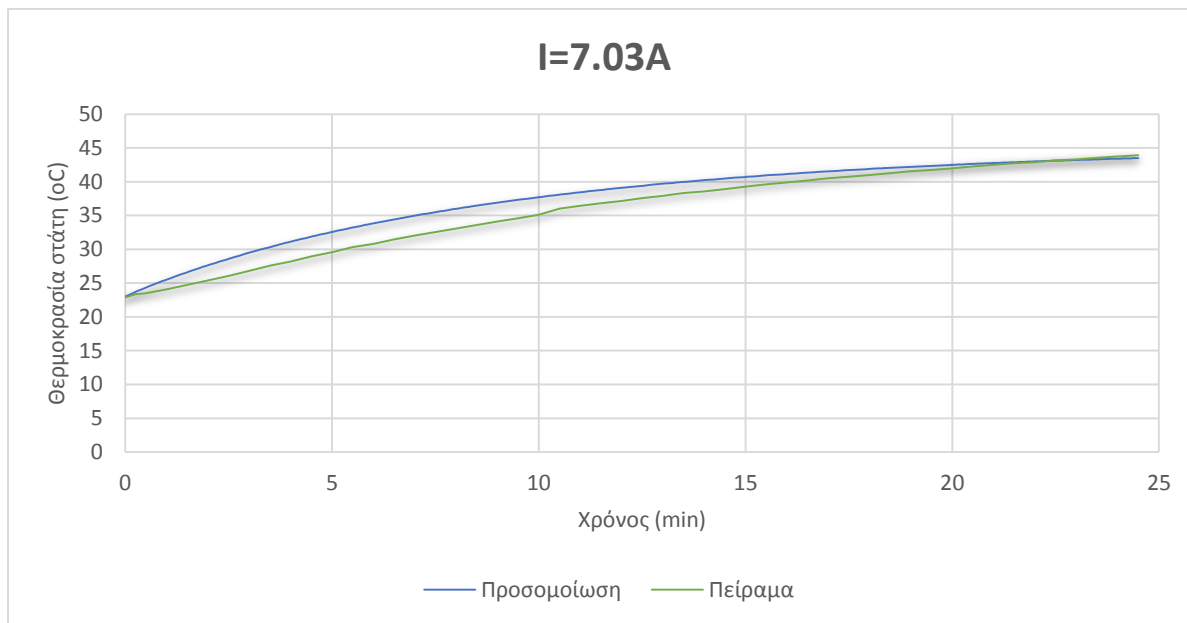
Σχήμα 5.35: Μετρήσεις θερμοκρασίας μετά το κλείσιμο της γεννήτριας.

5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων ANSYS και πειραματικών μετρήσεων

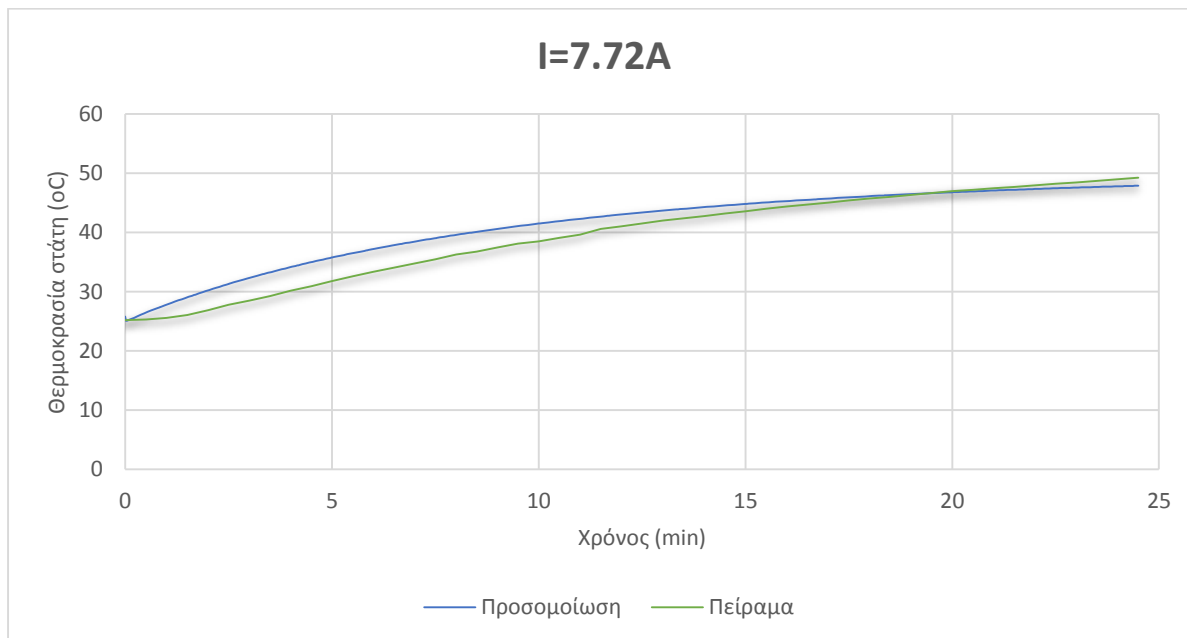
Για να διαπιστωθεί η ακρίβεια των πειραματικών μετρήσεων, πρέπει οι γραφικές παραστάσεις που προέκυψαν από αυτές να συγκριθούν με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Συγκεκριμένα, θα παρουσιαστούν στα ίδια γραφήματα οι γραφικές παραστάσεις θερμοκρασίας-ρεύματος αφενός για τα τρία ρεύματα λειτουργίας (7.03 A, 7.72 A και 8.96 A) της γεννήτριας 600 W που εξετάστηκαν στο Κεφάλαιο 4 και αφετέρου για ρεύμα λειτουργίας 40.84 A, στο οποίο προσομοιώθηκε η γεννήτρια 5 kW στο ίδιο κεφάλαιο.

5.3.1 Σύγχρονη γεννήτρια AFPM 600 W

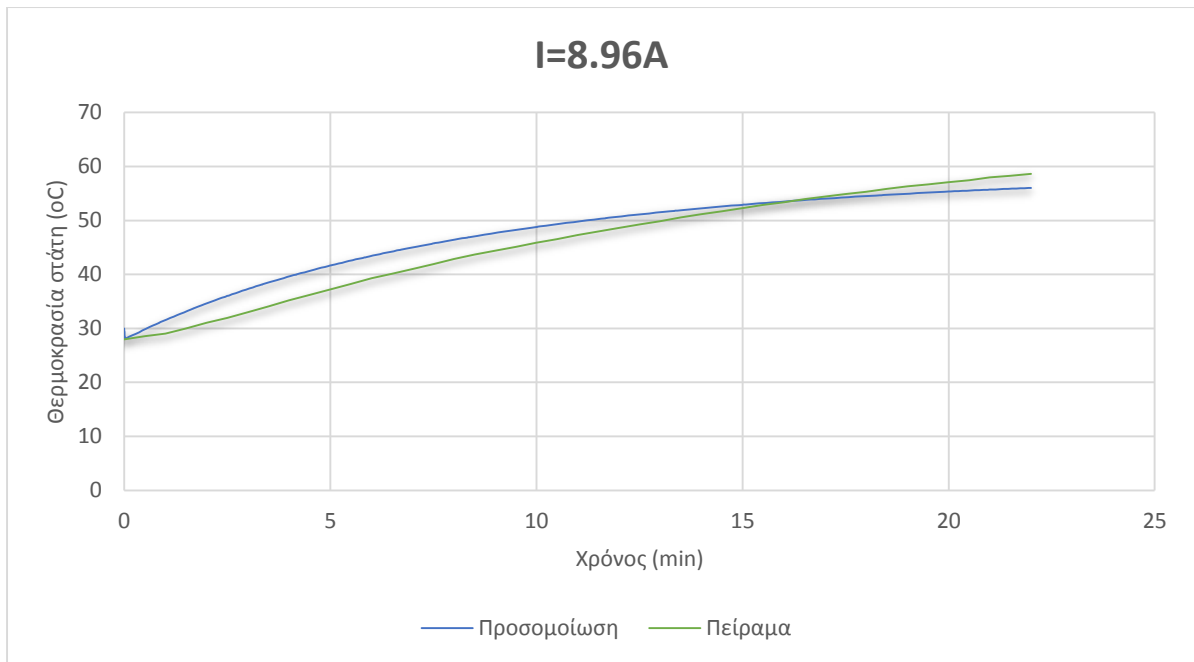
Για τη γεννήτρια αυτή προκύπτουν τα εξής τρία γραφήματα:



Σχήμα 5.36: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης και πειράματος για γεννήτρια 600 W και ρεύμα λειτουργίας 7.03 A.



Σχήμα 5.37: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης και πειράματος για γεννήτρια 600 W και ρεύμα λειτουργίας 7.72 A.

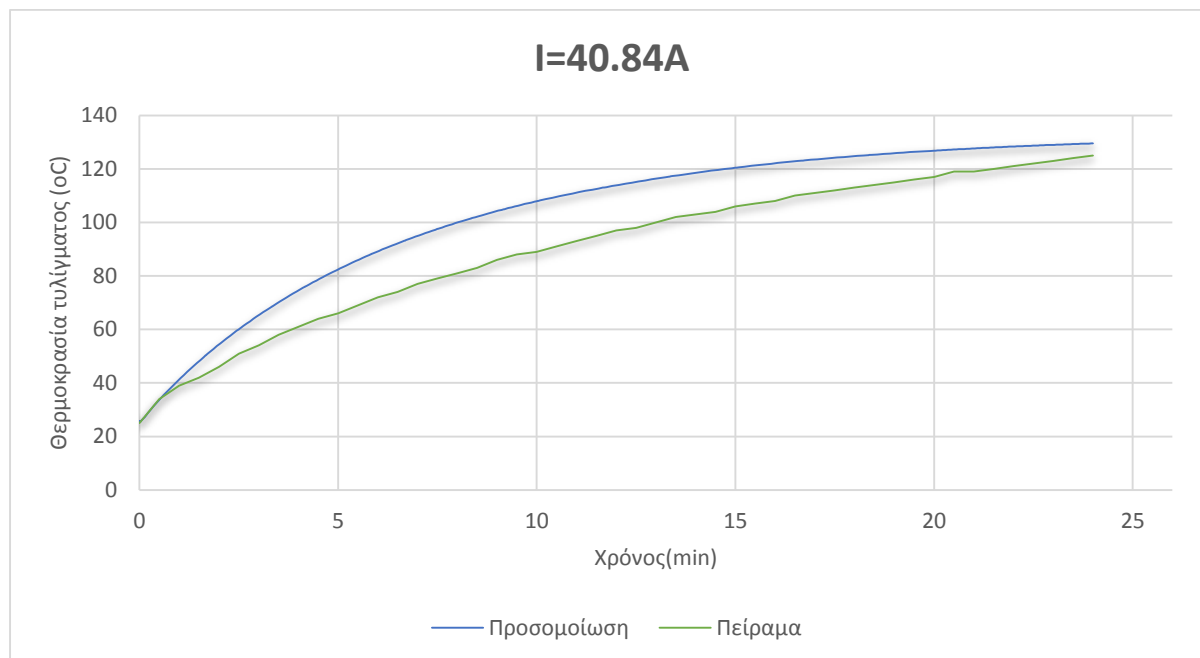


Σχήμα 5.38: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης και πειράματος για γεννήτρια 600 W και ρεύμα λειτουργίας 8.96 A.

Στα παραπάνω γραφήματα βλέπουμε τις θερμοκρασίες του στάτη, τόσο από την προσομοίωση όσο και από τις πειραματικές μετρήσεις, να συμβαδίζουν. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης προσεγγίζει σαφώς καλύτερα από το πειραματικό αποτέλεσμα την καμπύλη της λογαριθμικής συνάρτησης, που είναι θεωρητικά το αναμενόμενο αποτέλεσμα. Ωστόσο, οι δύο καμπύλες δεν έχουν ποτέ διαφορά θερμοκρασίας πάνω από 5 °C, ενώ οι θερμοκρασίες των τελικών καταστάσεών τους δείχνουν να προσεγγίζουν την ίδια τιμή αρκετά καλά.

5.3.1 Σύγχρονη γεννήτρια AFPM 5 kW

Η γεννήτρια αυτή εξετάστηκε για ρεύμα λειτουργίας 40.84 A και το γράφημα της σύγκρισης των δύο αποτελεσμάτων είναι το ακόλουθο:



Σχήμα 5.39: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης και πειράματος για γεννήτρια 5 kW και ρεύμα λειτουργίας 40.84 A.

Στην περίπτωση αυτή παρατηρούμε μια αρκετά μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των δύο καμπυλών από ότι προηγουμένως. Συγκεκριμένα, οι μετρήσεις του πειράματος είναι διαρκώς χαμηλότερα από τις τιμές της προσομοίωσης και μόνο προς το τέλος δείχνουν να τις πλησιάζουν. Η συμπεριφορά αυτή δικαιολογείται, γιατί στην προσομοίωση οι απώλειες είναι σταθερές και ίσες με τις ονομαστικές εξαρχής, ενώ στο πείραμα αυξάνονται σταδιακά μέχρι να φτάσουν τις ονομαστικές. Αυτό συμβαίνει γιατί, παρόλο που το ρεύμα είναι σταθερό, η αντίσταση αυξάνεται ανάλογα με τη θερμοκρασία. Σημαντικό ρόλο παίζει επίσης το γεγονός ότι στην πραγματικότητα η θερμοκρασία δεν έχει τη δυνατότητα να ακολουθήσει μια τόσο μεγάλη αύξηση του ρεύματος και των απωλειών, με αποτέλεσμα να ακολουθεί μια πιο γραμμική συμπεριφορά.

Στον Πίνακα 5.17 παρουσιάζονται οι τελικές τιμές της θερμοκρασίας προσομοίωσης και πειράματος για όλες τις συνθήκες λειτουργίας, καθώς και το σφάλμα του πειράματος για κάθε περίπτωση:

Γεννήτρια	Ρεύμα λειτουργίας (A)	Προσομοίωση (°C)	Πείραμα (°C)	Σφάλμα (%)
600 W	7.03	43.506	43.94	0.988
	7.72	47.9	49.24	2.721
	8.96	56.035	58.65	4.459
5 kW	40.84	129.54	125	-3.505

Πίνακας 5.17: Τελικές τιμές προσομοιώσεων και πειραμάτων για κάθε γεννήτρια και κάθε ρεύμα λειτουργίας και αντίστοιχα σφάλματα.

5.4 Μετρήσεις πεδίου δοκιμών

Πέραν των πειραματικών μετρήσεων στο εργαστήριο, η γεννήτρια ισχύος 600 W τοποθετήθηκε στο πεδίο δοκιμών, προκειμένου να προκύψουν δεδομένα για τη λειτουργία της υπό κανονικές συνθήκες. Έτσι, όπως και στο εργαστήριο, για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του στάτη χρησιμοποιήθηκε ένας αισθητήρας θερμότητας PT 100 τοποθετημένος δίπλα στο «πόδι» του τυλίγματος, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.5. Η ανεμογεννήτρια αφέθηκε να λειτουργεί και έπειτα συλλέχθηκαν τα δεδομένα. Η επεξεργασία των δεδομένων έγινε για τρεις μέρες, κατά τις οποίες η ανεμογεννήτρια δούλευε διαρκώς και στις οποίες παρουσιάζει ενδιαφέρον η λειτουργία της.

Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν bins δεδομένων για εκείνες τις ταχύτητες ανέμου, που το δείγμα των μετρήσεων ήταν επαρκές ($n > 30$). Έπειτα από αυτή τη ομαδοποίηση, έγινε υπολογισμός του κάθε μεγέθους που μας ενδιέφερε, δηλαδή ο μέσος όρος, η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή αφενός για τη θερμοκρασία του στάτη, που ήταν και το ζητούμενο της διαδικασίας, και αφετέρου για το ρεύμα, την τάση, τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, καθώς και την ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας. Υπολογίστηκε, τέλος, η μέση ηλεκτρική ισχύς, προκειμένου να προκύψει η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας. Κατά αυτόν τον τρόπο, προέκυψαν οι Πίνακες 5.18 (α) και (β) :

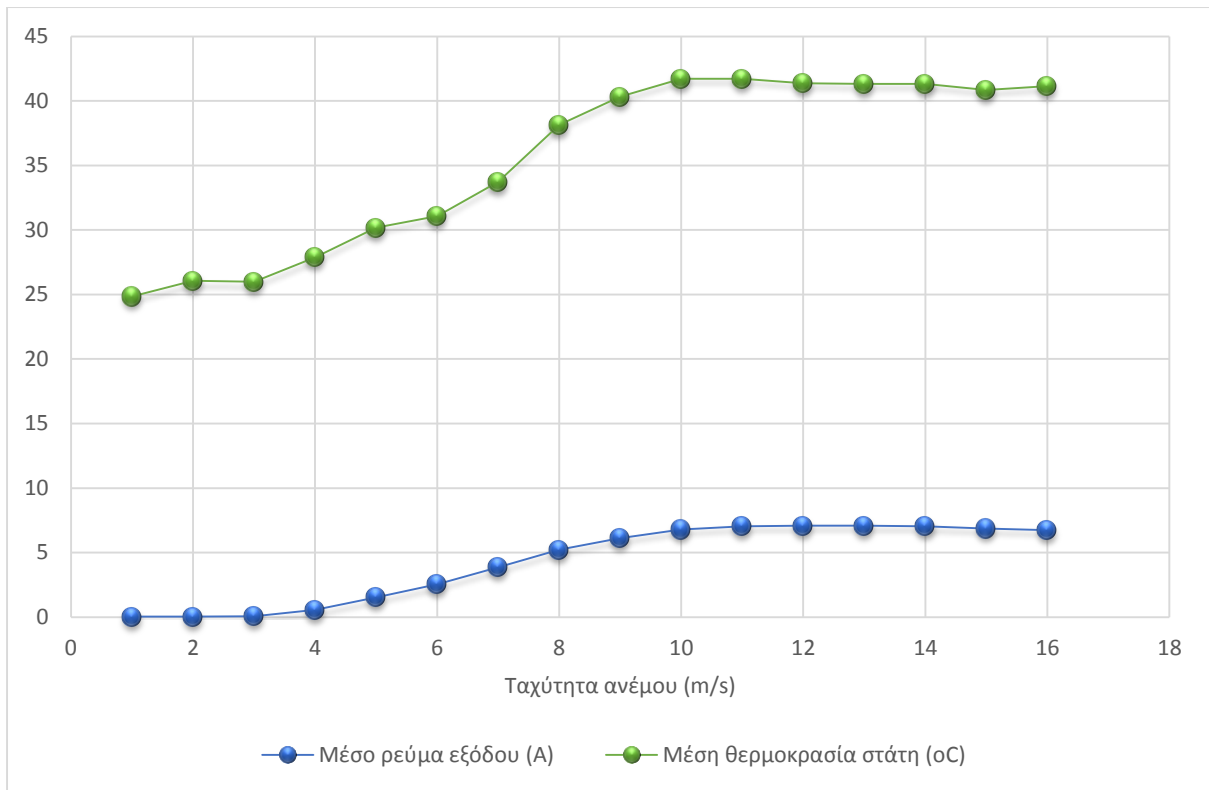
Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Ρεύμα (A)			Τάση (A)			Θερμοκρασία περιβάλλοντος (°C)		
	Μέσος όρος	Max	Min	Μέσος όρος	Max	Min	Μέσος όρος	Max	Min
[0.5,1.5]	0.046	0.047	0.046	0.662	0.664	0.659	23.684	23.688	23.678
[1.5,2.5]	0.049	0.052	0.044	3.954	30.836	0	24.083	24.497	22.996
[2.5,3.5]	0.067	0.607	0.045	10.654	40.999	0	23.878	24.638	23.292
[3.5,4.5]	0.573	1.538	0.047	40.544	41.832	0.66	24.614	25.055	23.349
[4.5,5.5]	1.523	4.07	0.464	41.63	42.559	40.418	24.834	25.73	24.582
[5.5,6.5]	2.539	6.76	0.916	42.079	43.762	41.198	24.829	26.771	24.56
[6.5,7.5]	3.867	8.309	1.587	42.608	44.17	41.546	25.086	26.863	24.061
[7.5,8.5]	5.217	10.645	2.413	43.068	46.031	41.94	25.481	27.39	23.108
[8.5,9.5]	6.119	12.55	2.213	43.346	46.969	41.984	25.488	27.775	22.865
[9.5,10.5]	6.791	12.357	3.302	43.598	46.97	41.996	25.426	27.777	22.847
[10.5,11.5]	7.028	13.092	2.904	43.738	47.044	42.028	25.32	27.78	22.846
[11.5,12.5]	7.094	14.204	2.472	43.758	47.374	41.858	25.206	27.728	22.842
[12.5,13.5]	7.095	14.946	2.549	43.647	46.957	41.817	25.293	27.718	22.845
[13.5,14.5]	7.029	14.131	2.072	43.567	46.65	41.631	25.524	27.499	23.025
[14.5,15.5]	6.858	13.76	2.452	43.51	45.849	41.937	25.773	27.228	23.255
[15.5,16.5]	6.731	14.056	2.763	43.467	45.538	41.985	26.14	27.032	23.935

Πίνακας 5.18 (α): Bins ταχύτητας ανέμου και επεξεργασμένες μετρήσεις.

Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Θερμοκρασία στάτη (°C)			Ταχύτητα περιστροφής (RPM)			Μέση ηλεκτρική ισχύς (W)
	Μέσος όρος	Max	Min	Μέσος όρος	Max	Min	
[0.5,1.5]	24.84	24.89	24.81	0	0	0	0.053
(1.5,2.5]	26.07	27.28	23.09	24.179	499.832	0	0.333
(2.5,3.5]	25.99	27.74	24.83	64.79	499.944	0	1.239
(3.5,4.5]	27.87	31.94	24.96	245.565	262.552	0	40.226
(4.5,5.5]	30.19	36.78	27.8	262.063	296.069	244.97	109.782
(5.5,6.5]	31.08	41.54	28.17	275.327	332.136	253.14	185.037
(6.5,7.5]	33.73	48.29	28.75	293.009	355.822	263.461	285.389
(7.5,8.5]	38.13	51.38	26.65	311.652	384.82	273.742	389.191
(8.5,9.5]	40.312	51.54	26.35	324.281	412.535	271.887	459.404
(9.5,10.5]	41.71	51.62	26.33	334.256	414.879	284.706	512.782
(10.5,11.5]	41.71	51.67	26.35	338.119	425.867	280.509	532.406
(11.5,12.5]	41.356	51.64	28.03	338.955	439.96	273.659	537.629
(12.5,13.5]	41.32	51.62	28.67	338.158	447.659	275.23	536.355
(13.5,14.5]	41.32	51.66	29.2	336.82	443.579	268.569	530.4
(14.5,15.5]	40.84	51.53	29.26	334.457	432.163	273.793	516.823
(15.5,16.5]	41.15	51.51	30.5	332.823	437.125	278.008	506.772

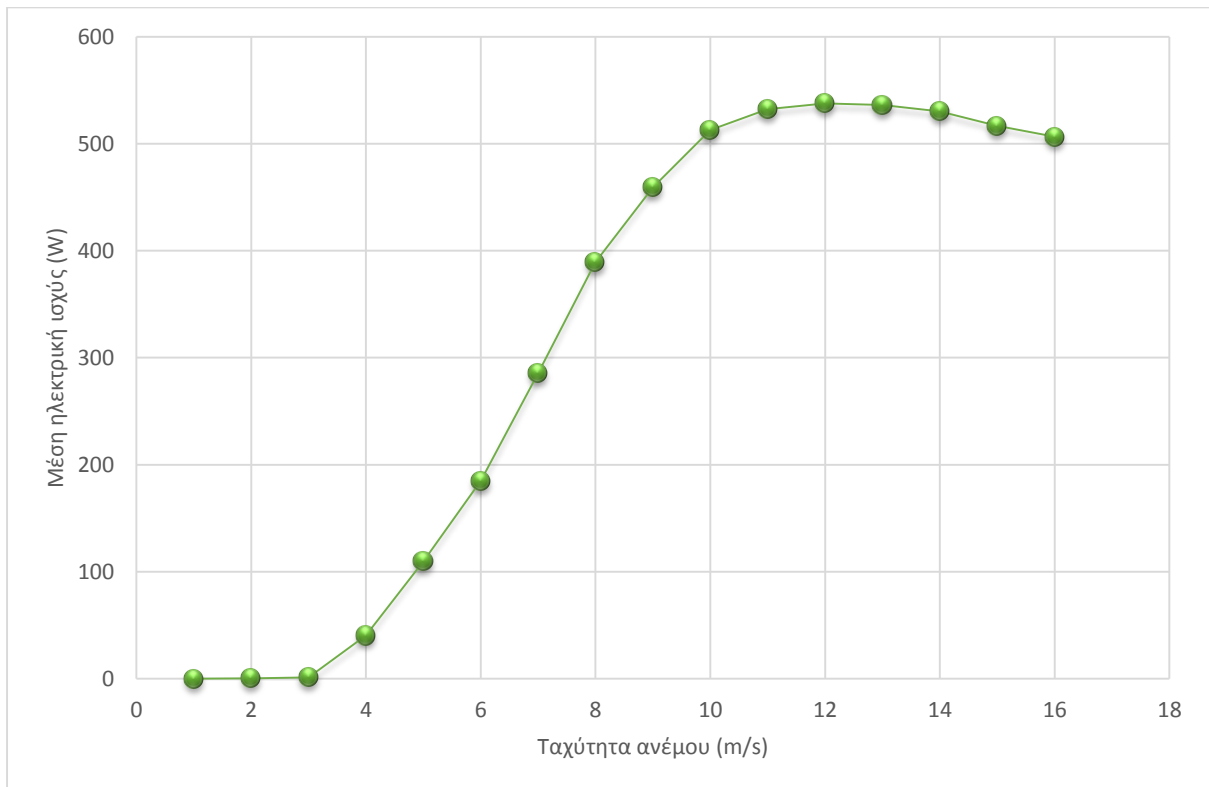
Πίνακας 5.18 (β): Συνέχεια προηγούμενου πίνακα.

Από της παραπάνω πίνακες μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η ταχύτητα ένταξης της ανεμογεννήτριας v_{cut-in} είναι στο διάστημα ταχυτήτων (4.5,5.5]. Επιπλέον, παρατηρούμε πως το ρεύμα προσεγγίζει της ονομαστικές τιμές του για ταχύτητες ανέμου κοντά στα 9 m/s. Είναι εμφανής, επίσης, η πολύ μικρή διακύμανση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, η οποία δεν ξεπερνά ποτέ τους 5 °C, παρόλο που οι μετρήσεις έγιναν κατά τη διάρκεια καλοκαιρινών μηνών και η διαφορά μέρας-νύχτας θα έπρεπε να είναι μεγαλύτερη. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι το θερμόμετρο μέτρησης της θερμοκρασίας περιβάλλοντος βρίσκεται υπό σκιά. Τέλος, παρατηρείται η εξάρτηση της θερμοκρασίας του στάτη από το ρεύμα, καθώς όταν αυξάνεται το ρεύμα, η θερμοκρασία στάτη ακολουθεί την ίδια συμπεριφορά. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει και από το γράφημα που ακολουθεί:



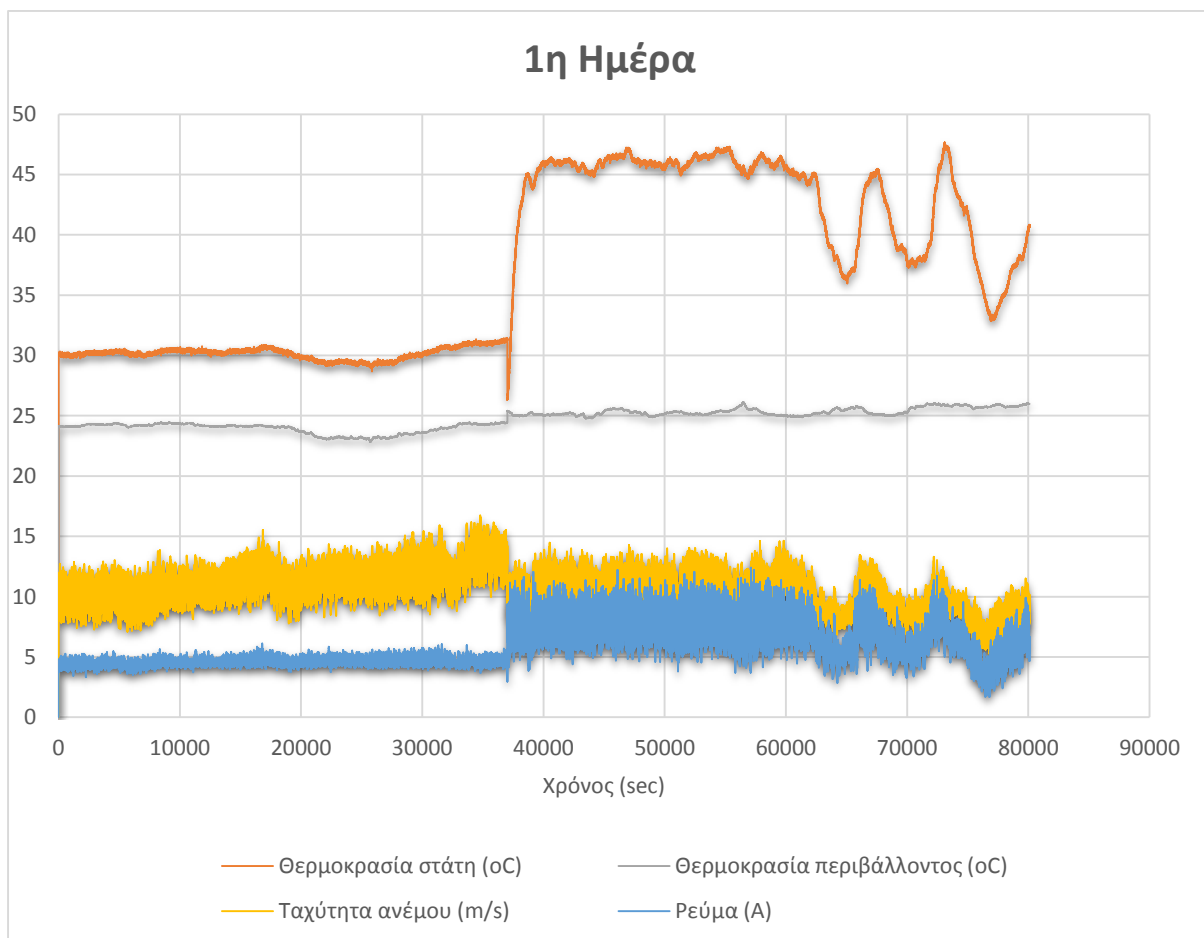
Σχήμα 5.40: Ρεύμα και θερμοκρασία στάτη συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου.

Στο παρακάτω γράφημα έχει σχεδιαστεί η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας, δηλαδή η ηλεκτρική ισχύς συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου:

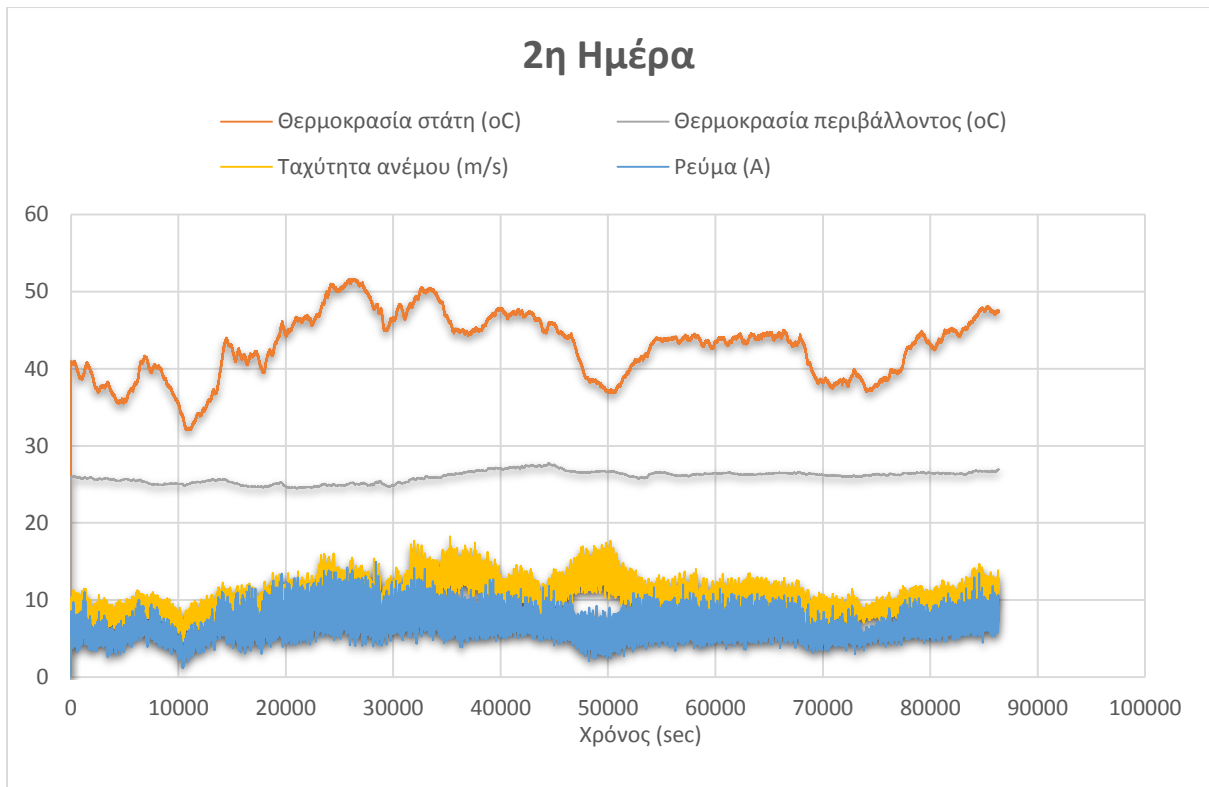


Σχήμα 5.41: Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας.

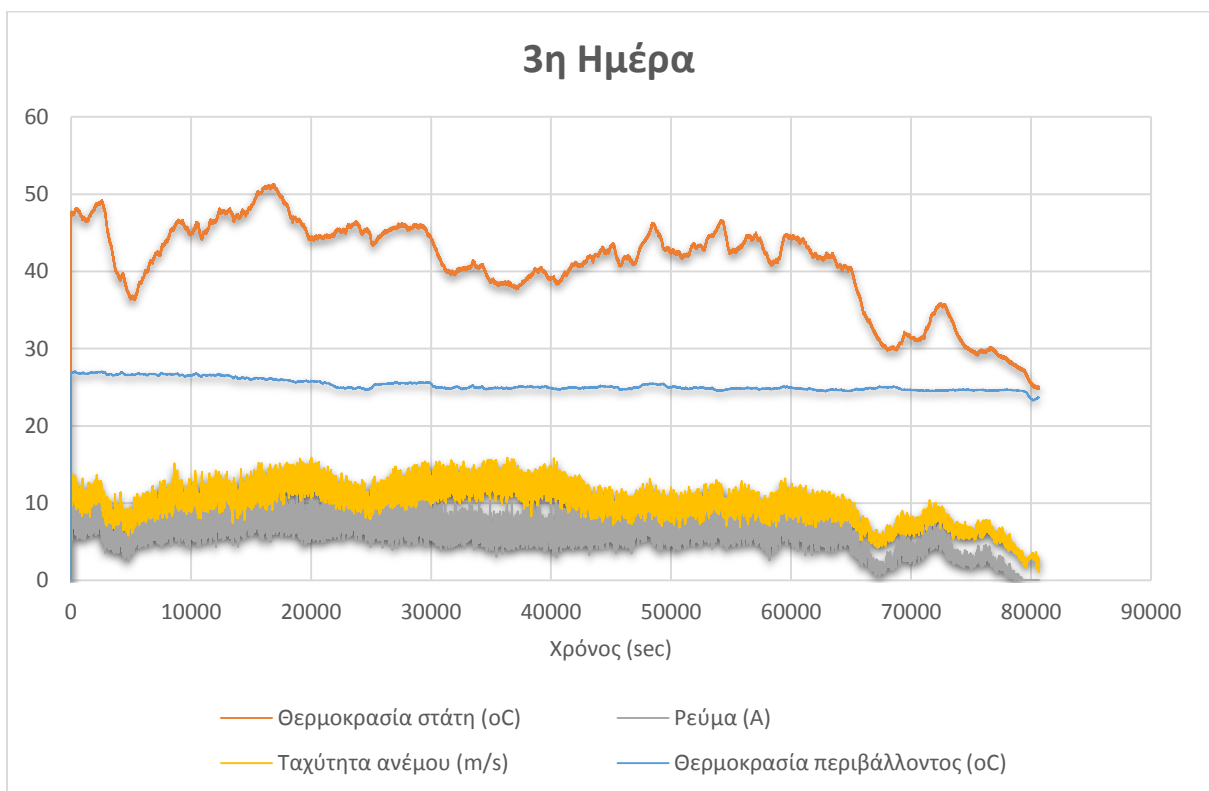
Ακολουθούν οι γραφικές απεικονίσεις της ταχύτητας ανέμου, του ρεύματος, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και στάτη συναρτήσει του χρόνου για τις τρεις μέρες λειτουργίας της ανεμογεννήτριας:



Σχήμα 5.42: Ταχύτητα ανέμου, ρεύμα, θερμοκρασία περιβάλλοντος και στάτη για 1^η υπό εξέταση ημέρα.



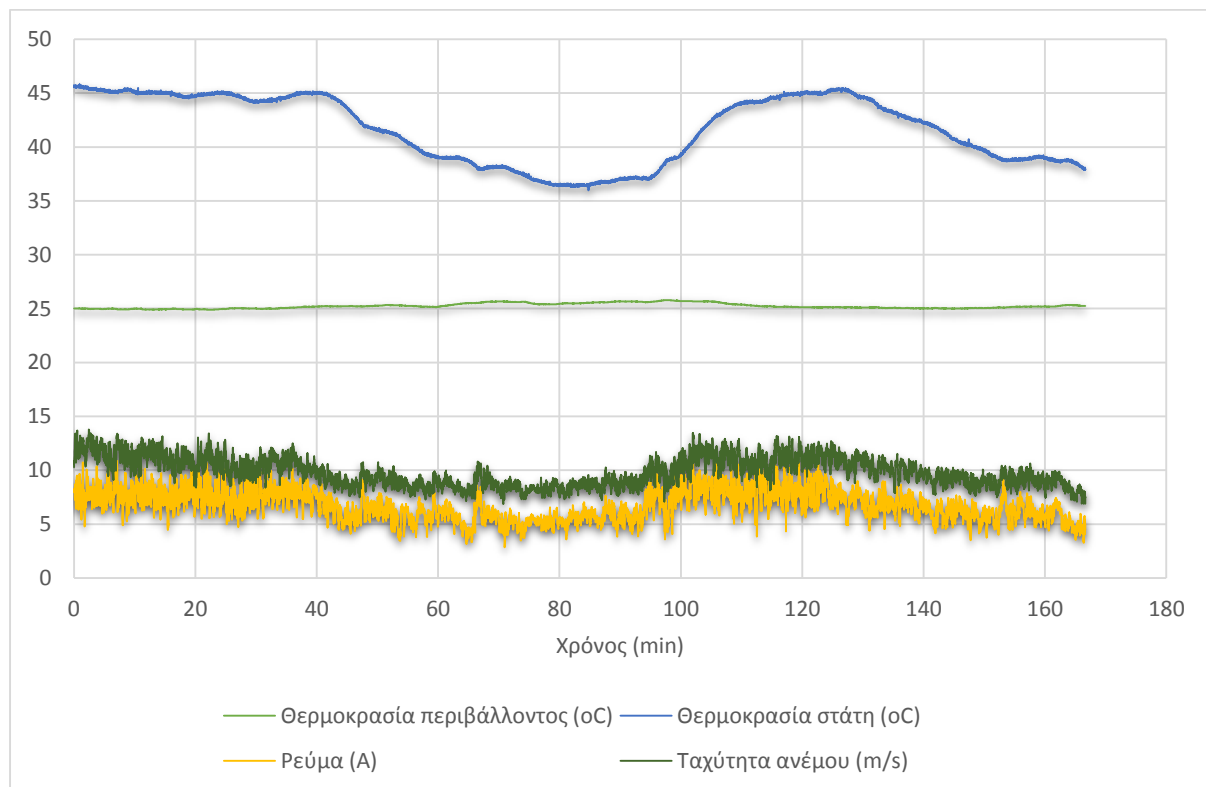
Σχήμα 5.43: Ταχύτητα ανέμου, ρεύμα, θερμοκρασία περιβάλλοντος και στάτη για 2^η υπό εξέταση ημέρα.



Σχήμα 5.44: Ταχύτητα ανέμου, ρεύμα, θερμοκρασία περιβάλλοντος και στάτη για 3^η υπό εξέταση ημέρα.

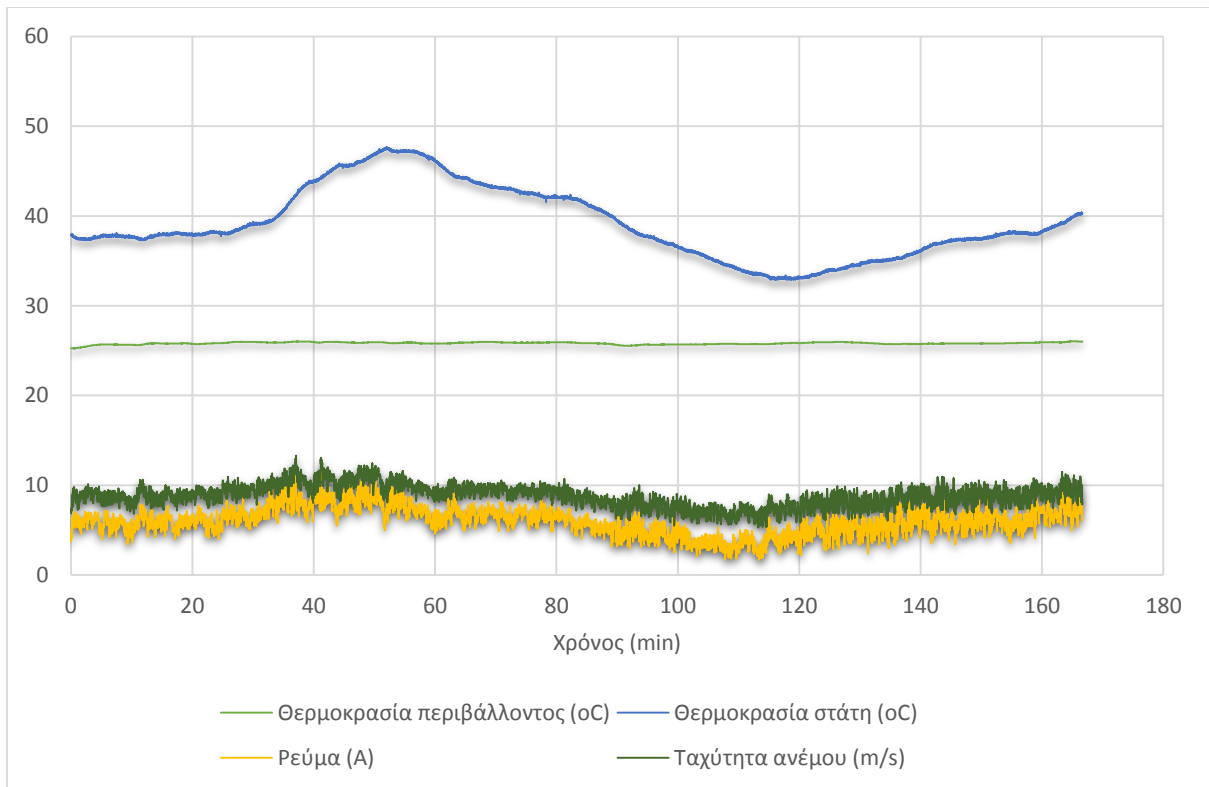
Παρακάτω θα εξεταστούν ειδικές περιπτώσεις λειτουργίας της γεννήτριας, κατά τις οποίες υπάρχει απότομη αύξηση ή πτώση της ταχύτητας του ανέμου, για να προκύψουν συμπεράσματα για την αντίδραση της γεννήτριας, ειδικά όσον αφορά τη θερμική συμπεριφορά της.

Στα ακόλουθα δύο γραφήματα παρατίθενται δύο σημεία της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας την πρώτη ημέρα, όπου παρατηρούνται βυθίσεις και αυξήσεις της ταχύτητας ανέμου:



Σχήμα 5.45: Διάστημα λειτουργίας 1^{ης} μέρας, όπου φαίνεται η εξάρτηση της θερμοκρασίας στάτη από ταχύτητα ανέμου, ρεύμα και θερμοκρασία περιβάλλοντος.

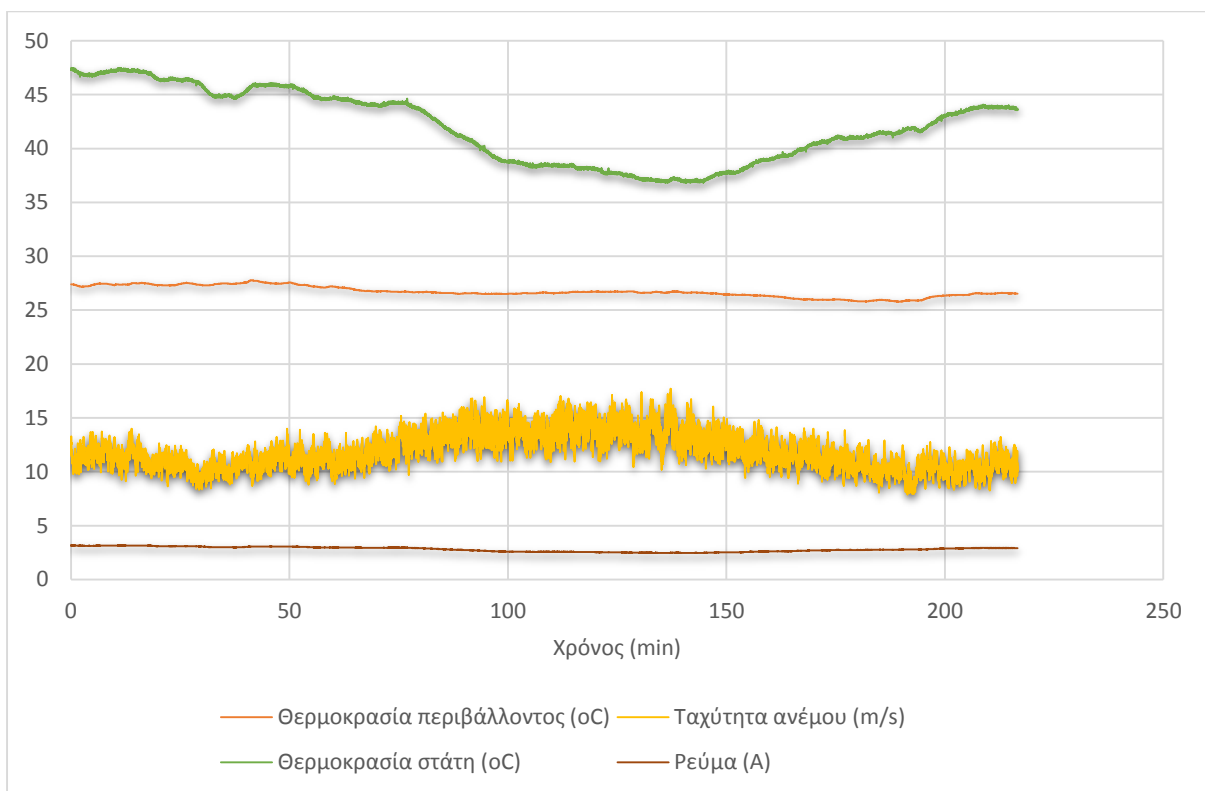
Εδώ παρατηρούμε ένα διάστημα λειτουργίας περίπου τριών ωρών (18:24:49 – 21:11:28), όπου αρχικά υπάρχει μια απότομη πτώση της ταχύτητας του ανέμου, έπειτα μια αύξηση και μια πτώση πάλι μετά. Με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος να διατηρείται σχεδόν σταθερή και να μην επηρεάζει σημαντικά τη θερμοκρασία του στάτη, παρατηρούμε πως η θερμοκρασία του στάτη ακολουθεί τις αυξομειώσεις του ρεύματος λειτουργίας με μια χρονική καθυστέρηση περίπου 5 λεπτών. Με άλλα λόγια, όταν αρχίσει να μειώνεται η ταχύτητα του ανέμου και επακόλουθα το ρεύμα της γεννήτριας, η θερμοκρασία στο στάτη θα αντληφθεί τη διαφορά αυτή μετά από ένα μικρό χρονικό διάστημα.



Σχήμα 5.46: Θερμοκρασία του στάτη και εξάρτησή του από ταχύτητα ανέμου, ρεύμα και θερμοκρασία περιβάλλοντος.

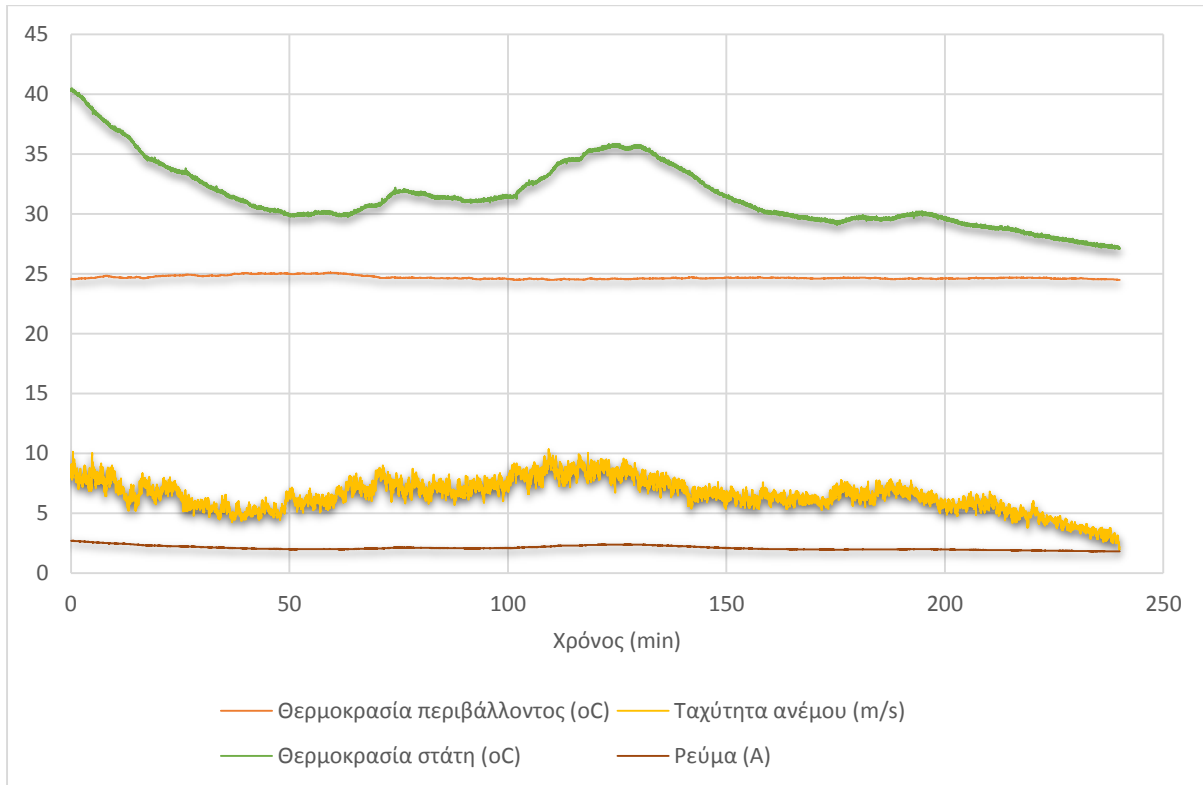
Στο γράφημα αυτό μπορεί να εξαχθεί παρόμοιο συμπέρασμα με προηγουμένως. Συγκεκριμένα, εδώ βλέπουμε τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας από την ώρα 21:11:29 μέχρι 23:58:07, όπου υπάρχει αρχικά μια αύξηση του ρεύματος και έπειτα μια βύθιση, προτού αρχίσει να αυξάνεται πάλι. Και πάλι βλέπουμε αυτή τη χρονική καθυστέρηση στην αντίδραση της θερμοκρασίας του στάτη, που εδώ φτάνει και στα 10 λεπτά.

Παρακάτω παρατίθεται ένα διάστημα της δεύτερης ημέρας, συγκεκριμένα κατά τις ώρες 11:40:23 – 15:17:01, όπου η ταχύτητα ανέμου αυξάνεται σημαντικά και η ανεμογεννήτρια για λόγους ασφαλείας περιορίζει τη λειτουργία της. Το σύστημα αυτό ονομάζεται furling [14] και ο σκοπός του είναι ο περιορισμός της ταχύτητας περιστροφής της γεννήτριας, ώστε να αποφευχθεί η υπερθέρμανση της, και η μείωση των δυνάμεων που ασκούνται πάνω στις έλικες κατά τις υψηλές ταχύτητες ανέμου. Όλα αυτά επιδιώκονται σε συνδυασμό με τη διατήρηση της υψηλότερης δυνατής ισχύος εξόδου στην καμπύλη ισχύος. Το αποτέλεσμα αυτό επιτυγχάνεται στρέφοντας τις έλικες μακριά από τη διεύθυνση του ανέμου. Επιστρέφοντας στο γράφημα, παρατηρούμε αυτήν ακριβώς τη συμπεριφορά που περιγράφηκε προηγουμένως. Η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται πάνω από τα επιτρεπτά όρια και η γεννήτρια μέσω του furling ρίχνει τις στροφές της και κατά συνέπεια το ρεύμα λειτουργίας της. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειωθεί αρκετά και η θερμοκρασία του στάτη.



Σχήμα 5.47: Επίδραση του furling στη θερμοκρασία του στάτη.

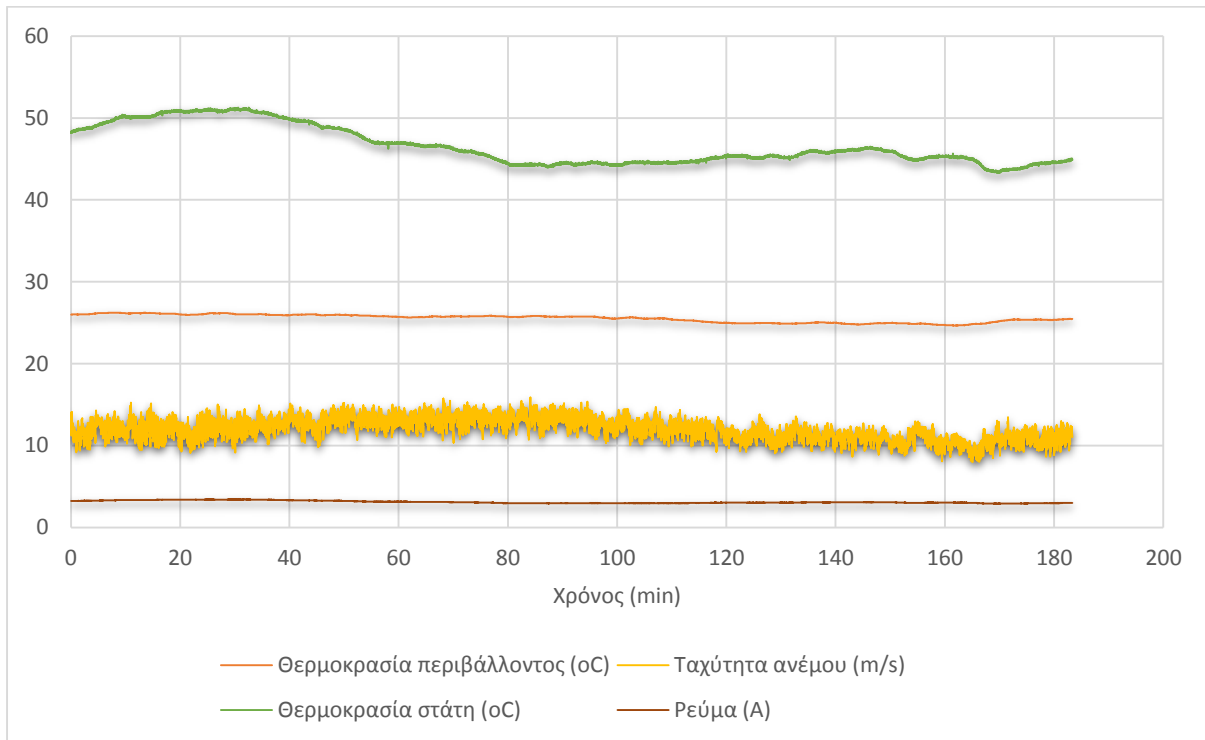
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η τρίτη μέρα, καθώς διαθέτει ένα χρονικό διάστημα στο οποίο υπάρχουν αυξομειώσεις της ταχύτητας ανέμου, καθώς και άλλα δύο που ξεπερνιούνται τα όρια της μέγιστης αποδεκτής ταχύτητας ανέμου και επεμβαίνει το σύστημα furling. Τα διαστήματα αυτά παρουσιάζονται στα ακόλουθα γραφήματα:



Σχήμα 5.48: Θερμοκρασία του στάτη και εξάρτησή του από ταχύτητα ανέμου, ρεύμα και θερμοκρασία περιβάλλοντος.

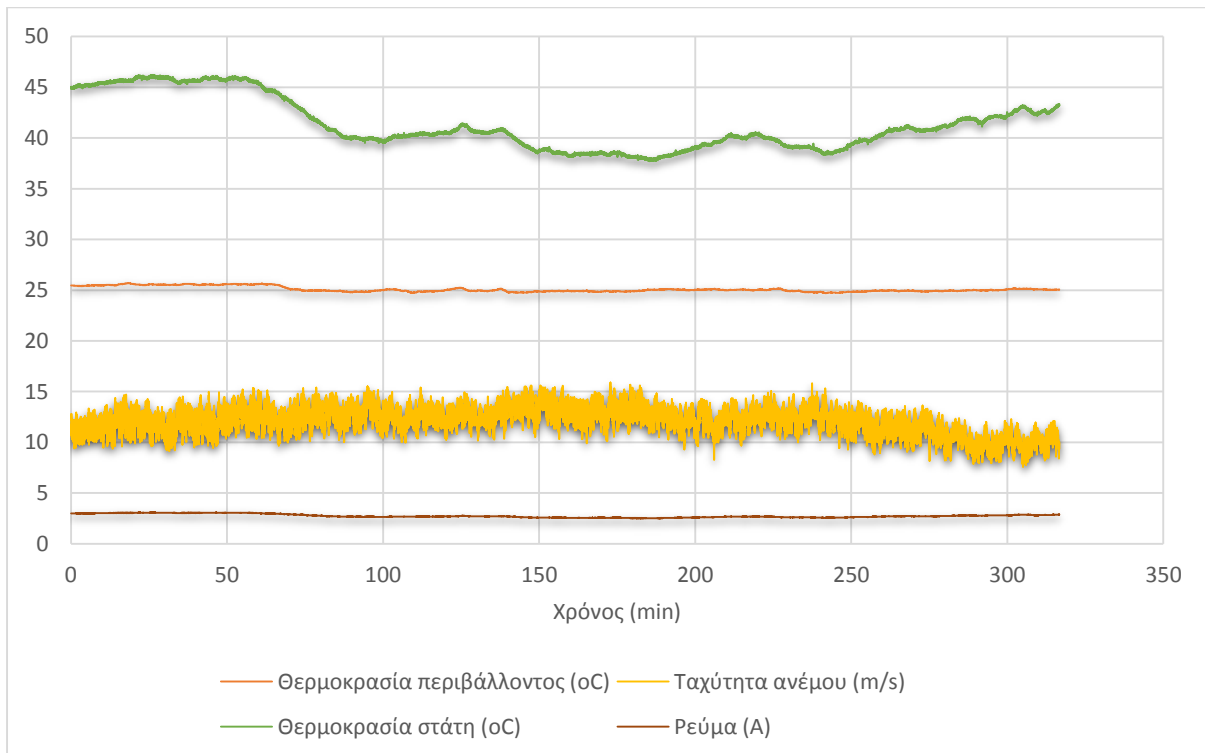
Στο παραπάνω γράφημα, που απεικονίζει τη λειτουργία κατά τις ώρες 18:02:59 – 22:12:59, είναι εμφανής η συμπεριφορά της θερμοκρασίας του στάτη που περιγράφηκε προηγουμένως, όπου μετά από κάθε πτώση και άνοδο της ταχύτητας του ανέμου και, επομένως, του ρεύματος, η προσαρμογή της θερμοκρασίας στις νέες συνθήκες λειτουργίες απαιτεί γύρω στα 10 – 15 λεπτά. Παρατηρούμε μάλιστα προς το τέλος της γραφικής παράστασης, όπου το ρεύμα της γεννήτριας έχει μειωθεί αισθητά, τη θερμοκρασία του στάτη να προσεγγίζει τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Στα ακόλουθα γραφήματα φαίνεται η επίδραση του furling στη λειτουργία της γεννήτριας, όπως αυτή περιγράφηκε προηγουμένως:



Σχήμα 5.49: Επίδραση του furling στη θερμοκρασία του στάτη.

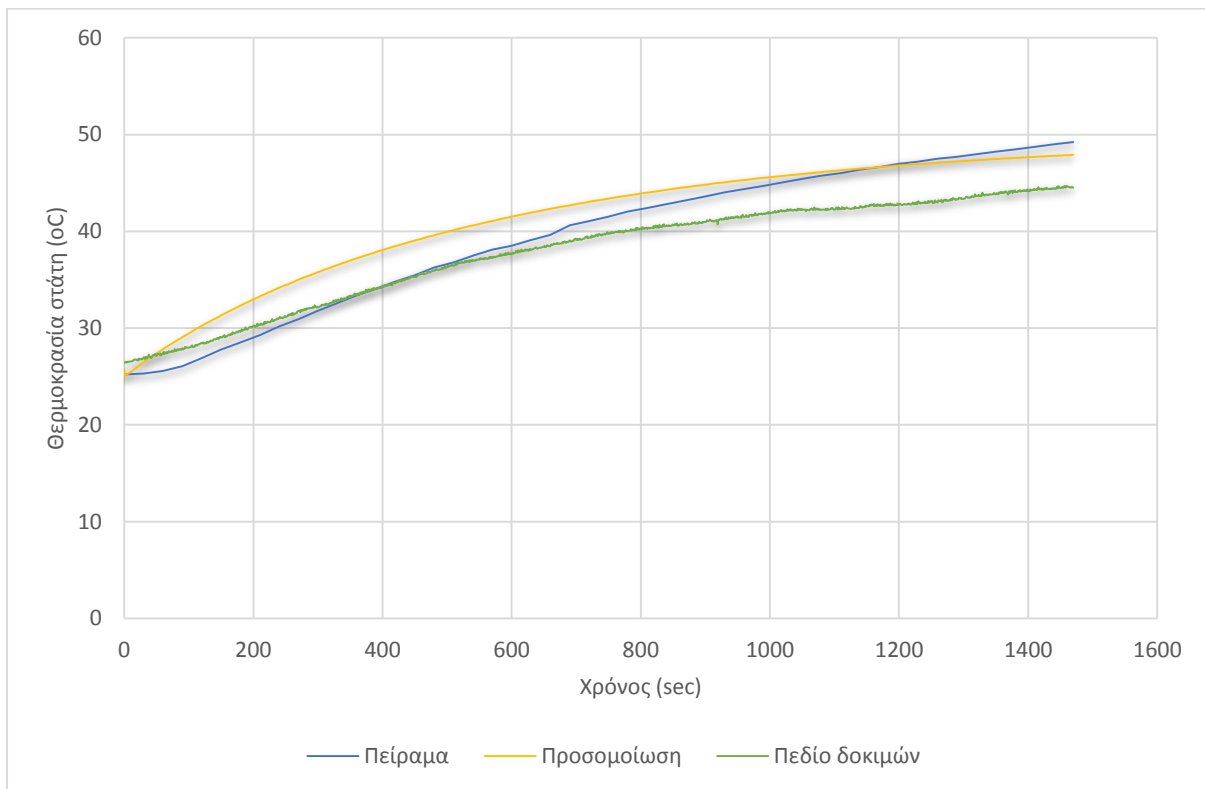
Στο παραπάνω γράφημα απεικονίζεται η λειτουργία της ανεμογεννήτριας για το χρονικό διάστημα 04: 09: 44 – 07: 13: 03, ενώ στο κάτω για τις ώρες 07: 13: 04 – 12: 29: 41.



Σχήμα 5.50: Επίδραση του furling στη θερμοκρασία του στάτη.

Στα δύο γραφήματα βλέπουμε ακριβώς την ίδια συμπεριφορά που περιγράφηκε και παραπάνω, όπου σε κάθε άνοδο της ταχύτητας του ανέμου πάνω από τα τεχνικά όρια, παρατηρείται πτώση του ρεύματος και της θερμοκρασίας.

Θέλοντας να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των τριών μεθόδων εξέτασης της θερμικής συμπεριφοράς της γεννήτριας 600 W, θα χρησιμοποιηθεί ένα διάστημα λειτουργίας της ανεμογεννήτριας στο πεδίο δοκιμών κατά την πρώτη μέρα που παρουσιάστηκε προηγουμένως, στο οποίο η θερμοκρασία του στάτη ξεκινά να αυξάνεται από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος υπό ρεύμα μέσης τιμής 7.7 A. Η γραφική παράσταση που θα προκύψει θα παρατεθεί δίπλα σε αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για τη σύγκριση προσομοίωσης και πειράματος. Προκύπτει επομένως το παρακάτω γράφημα:



Σχήμα 5.51: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης, πειράματος και πεδίου δοκιμών για θερμοκρασία στάτη υπό ρεύμα 7.72 A.

Όπως και προηγουμένως, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η λογαριθμική συμπεριφορά της προσομοίωσης οφείλεται στο γεγονός ότι από την αρχή οι απώλειες ορίζονται σταθερές και ίσες με τις ονομαστικές, σε αντίθεση με το πείραμα και το πεδίο δοκιμών, όπου θα αυξάνονται όσο αυξάνεται και η αντίσταση ως συνάρτηση της θερμοκρασίας, μέχρις ότου φτάσουν τις ονομαστικές. Παρατηρείται, επίσης, πως, ενώ η θερμοκρασία στο πεδίο δοκιμών ξεκινά από υψηλότερη αρχική τιμή, εν τέλει καταλήγει να είναι χαμηλότερα από τις άλλες δύο καμπύλες. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στη ροή του αέρα μέσα στη γεννήτρια λόγω του ανέμου που υπάρχει στο πεδίο δοκιμών και στην επακόλουθη ψύξη που προκαλεί. Η διαφορά πάντως των τιμών των τριών καμπυλών δεν φαίνεται να ξεπερνά ποτέ τους 5 °C.

5.5 Συμπεράσματα πειραμάτων-πεδίου δοκιμών

Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων και των μετρήσεων στο πεδίο δοκιμών προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις και συμπεράσματα:

- Συγκρίνοντας τις τρεις μεθόδους μέτρησης της θερμοκρασίας μεταξύ τους, συμπεραίνουμε πως τη μεγαλύτερη ακρίβεια παρουσιάζει ο αισθητήρας θερμότητας που τοποθετήθηκε στο τυλίγμα του χαλκού. Ικανοποιητική ακρίβεια παρουσιάζει και το θερμόμετρο των υπέρυθρων ακτινών, ενώ τη μικρότερη ακρίβεια έχει ο αισθητήρας θερμότητας στην επιφάνεια του στάτη, οι μετρήσεις του οποίου είναι εμφανώς επηρεασμένες από τη ροή του αέρα λόγω της περιστροφής του δρομέα. Αντίθετα, το θερμόμετρο, που μετράει θερμοκρασία στο ίδιο σημείο, δεν επηρεάζεται από την ψύξη αυτή λόγω του γεγονότος ότι μετράει απευθείας τη θερμοκρασία του στάτη μέσω των υπέρυθρων ακτινών.
- Από τα γραφήματα παρατηρούμε πως η θερμοκρασία του στάτη επηρεάζεται από τις απώλειες χαλκού και αυτές με τη σειρά τους από το τετράγωνο του ρεύματος, συμπεριφορά η οποία είναι και η αναμενόμενη από τη θεωρία.
- Ο αισθητήρας στην επιφάνεια του στάτη ψύχεται από τη ροή του αέρα που προκαλείται από την περιστροφή του δίσκου του δρομέα. Αυτό φαίνεται και όταν σταματά η λειτουργία της γεννήτριας, όπου η θερμοκρασία του αισθητήρα συνεχίζει να αυξάνεται λόγω της επίδρασης της εκλυόμενης από τον χαλκό θερμότητας, σε αντίθεση με τον αισθητήρα του τυλιγματος, η θερμοκρασία του οποίου μειώνεται κατευθείαν.
- Το κλείσιμο των αεραγωγών στην γεννήτρια των 5 kW εμποδίζει τον αέρα να περάσει μέσα από τους δίσκους και τον ωθεί προς την περιφέρεια της γεννήτριας. Αυτή η αυξημένη ροή αέρα ψύχει ακόμα περισσότερο τον αισθητήρα θερμότητας της επιφάνειας. Αντιθέτως, οι αεραγωγοί δε δείχνουν να συμβάλλουν στην ψύξη των τυλιγμάτων του χαλκού, καθώς τα αποτελέσματα για τη θερμοκρασία τους με και χωρίς αεραγωγούς είναι παραπλήσια.
- Ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας μειώνεται με την αύξηση του ρεύματος, καθώς αυξάνονται οι απώλειες σε σχέση με την παραγόμενη ισχύ. Σε αυτό συμβάλλει αρνητικά και η αύξηση της αντίστασης λόγω της θερμοκρασίας.
- Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με αυτά των πειραμάτων, η τελική προσέγγιση είναι αρκετά ακριβής. Οι σχετικά διαφορετικές καμπύλες που εμφανίζουν οφείλονται στο γεγονός ότι στην προσομοίωση οι απώλειες είναι εξ αρχής ίσες με τις ονομαστικές, σε αντίθεση με το πείραμα, όπου αυξάνονται με την αύξηση του ρεύματος, λόγω της εξάρτησης της αντίστασης από τη θερμοκρασία.

- Στο πεδίο δοκιμών παρατηρείται πως η θερμοκρασία του σάτη αντιλαμβάνεται τις αλλαγές του ρεύματος με μια χρονική καθυστέρηση 5 – 15 λεπτών. Συμπεραίνεται, δηλαδή, πως δεν υπάρχει άμεση ανταπόκριση της θερμοκρασίας του σάτη στις αλλαγές που προκύπτουν στο ρεύμα λειτουργίας λόγω των αυξομειώσεων της ταχύτητας του ανέμου. Ιδιαίτερη περίπτωση λειτουργίας αποτελούν οι περιπτώσεις όπου η ταχύτητα ανέμου αυξάνεται τόσο πολύ που παρεμβάλλεται για λόγους ασφαλείας το σύστημα furling και μειώνει το ρεύμα λειτουργίας, με συνέπεια να μειώνεται και η θερμοκρασία του σάτη.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και προτάσεις

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται ένας απολογισμός όσων μελετήθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν, προκειμένου να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα και προτάσεις για τη βελτίωση της παρούσας εργασίας, με σκοπό την εξέλιξη της έρευνας στον τομέα της θερμικής ανάλυσης γενικά και ειδικότερα αυτής των γεννητριών αξονικής ροής μονίμων μαγνητών.

Αρχικά, αξίζει να αναφερθεί πως είναι ιδιαίτερης σημασίας η εκ των προτέρων γνώση της θερμικής συμπεριφοράς μιας γεννήτριας προς κατασκευή, με σκοπό την πρόληψη και έγκαιρη διόρθωση πιθανών σχεδιαστικών ή κατασκευαστικών σφαλμάτων, που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε μη αναστρέψιμα σφάλματα, όπως την υπερθέρμανση της γεννήτριας.

6.1 Συμπεράσματα

6.1.1 Μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων - Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Η θερμική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε μέσω του θερμικού μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων δίνει σχετικά αξιόπιστα αποτελέσματα για τη μόνιμη κατάσταση της θερμοκρασίας σε διάφορα μέρη της γεννήτριας σε αρκετά γρήγορο χρόνο. Σημαντικό πλεονέκτημα του μοντέλου αυτού είναι ότι δεν απαιτεί σχεδίαση της προς ανάλυση γεννήτριας, διαδικασία που είναι χρονοβόρα. Συμπεραίνουμε, δηλαδή, πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί με σχετική ασφάλεια για την πρόβλεψη των θερμοκρασιών λειτουργίας μόνιμης κατάστασης, ως μία πρώτη ένδειξη της θερμικής συμπεριφοράς της γεννήτριας, ενώ παράλληλα παρέχει τις απαραίτητες για το επόμενο μοντέλο τιμές των συντελεστών συναγωγής, που, όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4, είναι πολύ δύσκολο να προσδιοριστούν πειραματικά.

Για μια λεπτομερέστερη πληροφόρηση για το θερμικό πεδίο της γεννήτριας μελετάται η τρισδιάστατη σχεδίαση και προσομοίωση της γεννήτριας με πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, όπως είναι το ANSYS, το οποίο, εκτός από τη μόνιμη κατάσταση, δίνει πληροφορίες και για τις μεταβατικές καταστάσεις της ανάλυσης. Το γεγονός αυτό έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εξεταστεί όλη η διάρκεια λειτουργίας της γεννήτριας και να εστιάσουμε σε χρονικά σημεία που μας ενδιαφέρουν. Η μέθοδος αυτή μας επιτρέπει να έχουμε μια αναλυτικότερη εικόνα για κάθε σημείο της γεννήτριας ξεχωριστά, γεγονός που συμβάλλει καθοριστικά στον εντοπισμό κρίσιμων σημείων, σημείων δηλαδή που η θερμοκρασία είναι ιδιαίτερος αυξημένη.

Όπως προκύπτει από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, τέτοια σημεία είναι τα τυλίγματα του χαλκού. Συνεπώς, πρέπει να εστιαστεί το ενδιαφέρον στο κατά πόσο είναι

ανεκτές οι θερμοκρασίες αυτές, για τη μόνωση των τυλιγμάτων, η θερμική αντοχή των οποίων ορίζεται από την κατασκευάστρια εταιρία στους 200 °C.

Η ανάλυση μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων σε προκατασκευαστικό στάδιο, κατά το οποίο μελετάται η σχεδίαση και η κατασκευή, βοηθάει στον εντοπισμό και στην πιθανή διόρθωση προβλημάτων υπερθέρμανσης, λόγω της μικρής απόκλισης που είδαμε ότι παρουσιάζει η μέθοδος από τα πειραματικά αποτελέσματα. Συμβάλλει, με άλλα λόγια, στη βελτιστοποίηση της ανάλυσης ως προς τη θερμική συμπεριφορά των μηχανών, μέσω της δυνατότητας, π.χ., για εξέταση μιας καλύτερης γεωμετρίας για απαγωγή θερμότητας ή αύξησης της διατομής του χαλκού.

Συμπερασματικά, απαιτείται ένας συνδυασμός του μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων και της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων για ένα ασφαλές τελικό αποτέλεσμα, καθώς για να μπορέσει να λειτουργήσει με ακρίβεια η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων απαιτήθηκε η εφαρμογή της μεθόδου συγκεντρωμένων παραμέτρων για τους συντελεστές συναγωγής, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.

6.1.2 Πειραματικές μετρήσεις – Πεδίο δοκιμών

Για τη διαπίστωση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων των προηγούμενων μοντέλων διενεργήθηκαν εργαστηριακά πειράματα υπό τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας, ενώ συλλέχθηκαν και δεδομένα από τη λειτουργία της γεννήτριας 600 W σε πεδίο δοκιμών. Ως συμπέρασμα από τη διαδικασία αυτή εξήχθη ότι η τελική προσέγγιση των αποτελεσμάτων προσομοιώσεων και πειραμάτων ήταν αρκετά ακριβής. Σημαντική διαφοροποίηση παρατηρήθηκε στις καμπύλες των αποτελεσμάτων μέχρι να φτάσουμε στην τελική προσέγγιση, γεγονός που δικαιολογείται λόγω του ότι στην προσομοίωση οι απώλειες είναι σταθερές και ίσες με τις ονομαστικές εξαρχής, ενώ στο πείραμα αυξάνονται σταδιακά μέχρι να φτάσουν τις ονομαστικές, γιατί, παρόλο που το ρεύμα είναι σταθερό, η αντίσταση αυξάνεται ανάλογα με τη θερμοκρασία.

Από την πειραματική διαδικασία προέκυψε ότι η τοποθέτηση του αισθητήρα θερμότητας στην επιφάνεια του στάτη επηρεάζεται σημαντικά από τη ροή αέρα που προκαλείται από την περιστροφή των δίσκων του δρομέα, με αποτέλεσμα να δίνει μετρήσεις με σημαντική απόκλιση από αυτές των άλλων μεθόδων μέτρησης, ενώ οι αεραγωγοί στους δίσκους του δρομέα δεν έδειξαν να επηρεάζουν τη θερμοκρασία των τυλιγμάτων. Επίσης, παρατηρήθηκε πως ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας μειώνεται με την αύξηση του ρεύματος, καθώς αυξάνονται οι απώλειες σε σχέση με την παραγόμενη ισχύ, στο οποίο συμβάλλει αρνητικά και η αύξηση της αντίστασης λόγω της θερμοκρασίας.

Σημαντικό συμπέρασμα για τις πειραματικές μεθόδους μέτρησης της θερμοκρασίας που χρησιμοποιήθηκαν είναι πως τη μεγαλύτερη ακρίβεια παρουσιάζει ο αισθητήρας θερμότητας που τοποθετήθηκε στο τύλιγμα του χαλκού. Ικανοποιητική ακρίβεια παρουσιάζει και το θερμόμετρο των υπέρυθρων ακτινών, ενώ χαμηλότερη ακρίβεια έχει ο αισθητήρας θερμότητας στην επιφάνεια του στάτη. Οι μετρήσεις του αισθητήρα αυτού

αποδείχθηκε στο Κεφάλαιο 5 πως επηρεάζονται από την ψύξη που προκαλεί η ροή του αέρα λόγω της περιστροφής του δρομέα, σε αντίθεση με το θερμομέτρο, το οποίο, ενώ μετράει θερμοκρασία στο ίδιο σημείο, δεν επηρεάζεται από την ψύξη αυτή λόγω του γεγονότος ότι μετράει απευθείας τη θερμοκρασία του στάτη μέσω των υπέρυθρων ακτινών.

Όσον αφορά το πεδίο δοκιμών, παρατηρείται πως η θερμοκρασία του στάτη αντιλαμβάνεται τις αλλαγές του ρεύματος με μια χρονική καθυστέρηση εύρους 5 – 15 λεπτών. Με άλλα λόγια, δεν υπάρχει άμεση ανταπόκριση της θερμοκρασίας του στάτη στις αλλαγές που προκύπτουν στο ρεύμα λειτουργίας λόγω των αυξομειώσεων της ταχύτητας του ανέμου. Αυτό πιθανώς να οφείλεται στη μεταβλητότητα που παρουσιάζουν τα μεγέθη αυτά στο πεδίο δοκιμών και στο εύλογο χρονικό διάστημα που απαιτείται για να σταθεροποιηθεί η κάθε τάση που εμφανίζεται.

Τέλος, η σύγκριση που πραγματοποιήθηκε μεταξύ προσομοίωσης, πειράματος και πεδίου δοκιμών υπό ρεύμα λειτουργίας 7.72 A έδειξε πολύ μικρή απόκλιση μεταξύ των διαφόρων αποτελεσμάτων, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το μοντέλο που προσομοιώθηκε ήταν ιδιαίτερος ακριβές, καθώς και ότι η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε ανταποκρίνεται σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

6.2 Προτάσεις

Με σκοπό την προώθηση της έρευνας και την εμβάθυνση στο πεδίο της θερμικής ανάλυσης γεννητριών αξονικής ροής μονίμων μαγνητών, θα μπορούσαν να προταθούν συγκεκριμένες βελτιώσεις και επεκτάσεις στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Αρχικά, προκύπτει η ανάγκη δημιουργίας ενός προτύπου πειραματικής εξέτασης της θερμικής συμπεριφοράς των γεννητριών αξονικής ροής μονίμων μαγνητών. Ως συμπέρασμα από την πειραματική διαδικασία, προέκυψε η έλλειψη μιας πιστοποιημένης διαδικασίας, που να λαμβάνει υπόψη της τους θερμοκρασιακούς περιορισμούς και να δοκιμάζει τις θερμικές αντοχές των υλικών της γεννήτριας, χωρίς να προκαλεί μη αναστρέψιμη βλάβη.

Επιπλέον, υπάρχει ανάγκη διεξαγωγής μετρήσεων στο πεδίο δοκιμών με γεννήτρια που να έχει ενσωματωμένο αισθητήρα θερμότητας στο τύλιγμα του χαλκού, ώστε να εφάπτεται του σημείου ενδιαφέροντος, που είναι το τύλιγμα, και να μην είναι τόσο ευάλωτος σε περιβαλλοντικές επιρροές, όπως παραδείγματος χάρη η θέρμανση από τις ακτίνες του ήλιου ή η ψύξη από τον άνεμο. Απώτερος σκοπός της διαδικασίας αυτής θα είναι η άντληση ακριβέστερων δεδομένων για τις θερμοκρασίες στη γεννήτρια και επακόλουθα η ακριβέστερη μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς της γεννήτριας υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας.

Μεγαλύτερη εμβάθυνση θα μπορούσε να γίνει στην περίοδο λήψης μετρήσεων στο πεδίο δοκιμών, ώστε να εξεταστεί η θερμική συμπεριφορά της γεννήτριας κατά τη διάρκεια διαφορετικών εποχών, με σκοπό να φανεί με περισσότερη σαφήνεια η επίδραση εξωτερικών παραγόντων, όπως, κατά κύριο λόγο, η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, στη θερμοκρασία των τυλιγμάτων. Πέραν των εποχών, διαχωρισμός θα μπορούσε να εξεταστεί και κατά τη

διάρκεια ενός εικοσιτετράωρου, μεταξύ της λειτουργίας κατά τη διάρκεια της μέρας και της νύχτας.

Τέλος, περισσότερη εξέταση χρήζει ο ρόλος που παίζουν οι αεραγωγοί στους δίσκους του δρομέα στη θερμική συμπεριφορά της γεννήτριας και κατά πόσο συμβάλλουν στην ψύξη της. Προς αυτήν την κατεύθυνση θα συμβάλλει και η εξέταση μεθόδων ψύξης για την αντιμετώπιση προβλημάτων υπερθέρμανσης ιδιαίτερα στη γεννήτρια 5 kW . Μια άλλη λύση σε τέτοιου είδους προβλήματα θα μπορούσε να είναι η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας της γεννήτριας με παράμετρο την αντιμετώπιση προβλημάτων υπερθέρμανσης σε τμήματά της.

Παραρτήματα

Παράρτημα Α

Προγράμματα σε MATLAB

A.1 Κώδικας συγκεντρωμένων παραμέτρων για γεννήτρια AFPM 600 W

```
syms theta1 theta2 theta3

% Γενικά Χαρακτηριστικά
P = 0.6; % Ονομαστική ισχύς σε kW
f = 50; % Συχνότητα σε Hz
n_p = 12; % Αριθμός πόλων
n_i = 9; % Αριθμός πηνίων

% Δρομέας
d_disc = 0.008; % Πάχος σε m
rout_disc = 0.15; % Εξωτερική ακτίνα σε m
rin_disc = 0.104; % Εσωτερική ακτίνα σε m
d_magnet = 0.01; % Πάχος μαγνήτη σε m
w_magnet = 0.03; % Πλάτος μαγνήτη σε m
l_magnet = 0.046; % Μήκος μαγνήτη σε m

% Στάτης
d_i = 0.013; % Αξονικό πάχος πηνίου σε m
side_depth = 0.021; % Πάχος πηνίου σε m
n_w = 90; % Αριθμός σπειρών
diameter_copper = 0.00095; % Διάμετρος χαλκού m

% Σταθερές αέρα
u = 0.000018467; % Δυναμικό ιξώδες σε Pa*s
p = 1.177; % Πυκνότητα αέρα σε kg/m^3
k = 0.02624; % Θερμική αγωγιμότητα σε W/(m*C)

% Απώλειες
DP_lw = 103.057; % Απώλειες χαλκού σε W
DP_e = 2.706; % Απώλειες δινορρευσμάτων σε W
DP_rot = 9.138; % Απώλειες περιστροφής σε W

% Σταθερές
b = 0.00343; % Συντελεστής θερμικής διαστολής αέρα
g = 9.81; % Συντελεστής βαρύτητας
v = 0.00001569; % Κινηματικό ιξώδες
omega = 2*pi*(120*f/n_p)/60; % Γωνιακή ταχύτητα
Pr = 0.713; % Αριθμός Prandtl
Q = 0.004; % Ονομαστικός ρυθμός ροής αέρα σε m^3/s

% Εξωτερική επιφάνεια δίσκου δρομέα
Re1 = p*omega*(2*rout_disc)^2/(4*u); % Αριθμός Reynolds
Gr1 = b*g*(rout_disc)^3*pi^(3/2)*(theta3-theta2)/(v^2);
Nu1 = (2/5)*(Re1^2 + Gr1)^(1/4); % Μέσος αριθμός Nusselt
```

```

h_fr = k*Nu1/rout_disc; % Συντελεστής συναγωγής

% Περιφέρεια δίσκου δρομέα
Re2 = omega*(2*rout_disc)^2/v; % Αριθμός Reynolds
Nu2 = 0.133*Re2^(2/3)*Pr^(1/3); % Μέσος αριθμός Nusselt
h_p = k*Nu2/(2*rout_disc); % Μέσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας

% Σύστημα στάτη-δρομέα
Nu3 = 0.333*Q/(pi*v*rout_disc); % Μέσος αριθμός Nusselt
h_rs = 2*k*Nu3/(2*rout_disc); % Μέσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας
μεταξύ των δύο δίσκων

% Μισό της διάταξης του στάτη
Rc1 = 1/(h_rs*pi/4*((2*rout_disc+2*side_depth)^2-(2*rin_disc-
2*side_depth)^2)); % Θερμική αντίσταση συναγωγής μεταξύ στάτη και ροής αέρα
στο διάκενο
A1 = pi/4*((2*rout_disc)^2-(2*rin_disc)^2); % Επιφάνεια δίσκου δρομέα
A2 = pi/4*((2*rout_disc)^2-(2*rin_disc)^2);
F12 = 1;
s = 0.0000000567; % Σταθερά Stefan-Boltzmann σε W/(m2*K4)
e1 = 0.85; % Συντελεστής εκπομπής στάτη
eFe = 0.3;
ePM = 0.9;
a_i = 0.659;
e2 = eFe*(1-a_i)+ePM*a_i; % Συντελεστής εκπομπής αέρα
Rr1 = ((1-e1)/(e1*A1)-1/(A1*F12)-(1-
e2)/(e2*A2))/(s*(thetal+273+theta2+273)*((thetal+273)^2+(theta2+273)^2)); %
Αντίσταση μεταφοράς θερμότητας μέσω ακτινοβολίας μεταξύ στάτη και δίσκων
δρομέα

% Διάκενο αέρα
Rc2 = 1/(h_rs*pi/4*((2*rout_disc)^2-(2*rin_disc)^2)); % Θερμική αντίσταση
συναγωγής μεταξύ διακένου και δίσκου δρομέα
m = p*Q; % Μάζα ροής αέρα
c_p = 1005;
theta_alpha = 23; % Θερμοκρασία ατμόσφαιρας

% Δίσκος δρομέα
Rc3 = 4/(h_fr*pi*(2*rout_disc)^2); % Αντίδραση μεταφοράς θερμότητας μέσω
συναγωγής από εξωτερική επιφάνεια δίσκου στην ατμόσφαιρα
Rc3p = 4/(h_p*pi*2*rout_disc*d_disc); % Αντίδραση μεταφοράς θερμότητας μέσω
συναγωγής από περιφέρεια δίσκου στην ατμόσφαιρα

% Εξισώσεις αρχής διατήρησης ενέργειας
eq1 = 1/2*(DP_lw+DP_e)-(thetal-theta2)/Rc1-(thetal-theta3)/((1-e1)/(e1*A1)-
1/(A1*F12)-(1-
e2)/(e2*A2))/(s*(thetal+273+theta2+273)*((thetal+273)^2+(theta2+273)^2));
eq2 = (thetal-theta2)/Rc1-(theta2-theta3)/Rc2-2*m*c_p*(theta2-theta_alpha);
eq3 = (theta2-theta3)/Rc2-(thetal-theta3)/((1-e1)/(e1*A1)-1/(A1*F12)-(1-
e2)/(e2*A2))/(s*(thetal+273+theta2+273)*((thetal+273)^2+(theta2+273)^2))+1/
2*DP_rot-(theta3-
theta_alpha)/4/(0.06997*(75086.39505^2+2568714.436*(theta3-
theta2))^(1/4)*pi*(2*rout_disc)^2)-(theta3-theta_alpha)/Rc3p;

% Επίλυση συστήματος εξισώσεων
sol = solve(eq1,eq2,eq3);
t1 = double(sol.theta1) % Θερμοκρασία στάτη
t2 = double(sol.theta2) % Θερμοκρασία διακένου
t3 = double(sol.theta3) % Θερμοκρασία δρομέα

```

A.2 Κώδικας συγκεντρωμένων παραμέτρων για γεννήτρια AFPM 5 kW

```
syms theta1 theta2 theta3

% Γενικά Χαρακτηριστικά
P = 5; % Ονομαστική ισχύς σε kW
f = 50; % Συχνότητα σε Hz
n_p = 32; % Αριθμός πόλων
n_i = 24; % Αριθμός πηνίων

% Δρομέας
d_disc = 0.01; % Πάχος σε m
rout_disc = 0.34887; % Εξωτερική ακτίνα σε m
rin_disc = 0.29087; % Εσωτερική ακτίνα σε m
d_magnet = 0.01; % Πάχος μαγνήτη σε m
w_magnet = 0.027; % Πλάτος μαγνήτη σε m
l_magnet = 0.058; % Μήκος μαγνήτη σε m

% Στάτης
d_i = 0.015; % Αξονικό πάχος πηνίου σε m
side_depth = 0.0223693; % Πάχος πηνίου σε m
n_w = 26; % Αριθμός σπειρών
diameter_copper = 0.00095; % Διάμετρος χαλκού m

% Σταθερές αέρα
u = 0.000018467; % Δυναμικό ιξώδες σε Pa*s
p = 1.177; % Πυκνότητα αέρα σε kg/m^3
k = 0.02624; % Θερμική αγωγιμότητα σε W/(m*C)

% Απώλειες
DP_lw = 1979.24; % Απώλειες χαλκού σε W
DP_e = 19.4504; % Απώλειες δινορρευσμάτων σε W
DP_rot = 24.8239; % Απώλειες περιστροφής σε W

% Σταθερές
b = 0.00343; % Συντελεστής θερμικής διαστολής αέρα
g = 9.81; % Συντελεστής βαρύτητας
v = 0.00001569; % Κινηματικό ιξώδες
omega = 2*pi*(120*f/n_p)/60; % Γωνιακή ταχύτητα
Pr = 0.713; Αριθμός Prandtl
Q = 0.04; % Ονομαστικός ρυθμός ροής αέρα σε m^3/s
% Εξωτερική επιφάνεια δίσκου δρομέα
Re1 = p*omega*(2*rout_disc)^2/(4*u); % Αριθμός Reynolds
Gr1 = b*g*(rout_disc)^3*pi^(3/2)*(theta3-theta2)/(v^2);
Nu1 = (2/5)*(Re1^2 + Gr1)^(1/4); % Μέσος αριθμός Nusselt
h_fr = k*Nu1/rout_disc; % Συντελεστής συναγωγής

% Περιφέρεια δίσκου δρομέα
Re2 = omega*(2*rout_disc)^2/v; % Αριθμός Reynolds
Nu2 = 0.133*Re2^(2/3)*Pr^(1/3); % Μέσος αριθμός Nusselt
h_p = k*Nu2/(2*rout_disc); % Μέσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας

% Σύστημα στάτη-δρομέα
Nu3 = 0.333*Q/(pi*v*rout_disc); % Μέσος αριθμός Nusselt
h_rs = 2*k*Nu3/(2*rout_disc); % Μέσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας
μεταξύ των δύο δίσκων
```

```

% Μισό της διάταξης του στάτη
Rc1 = 1/(h_rs*pi/4*((2*rout_disc+2*side_depth)^2-(2*rin_disc-
2*side_depth)^2)); % Θερμική αντίσταση συναγωγής μεταξύ στάτη και ροής αέρα
στο διάκενο
A1 = pi/4*((2*rout_disc)^2-(2*rin_disc)^2); % Επιφάνεια δίσκου δρομέα
A2 = pi/4*((2*rout_disc)^2-(2*rin_disc)^2);
F12 = 1;
s = 0.0000000567; % Σταθερά Stefan-Boltzmann σε W/(m2*K4)
e1 = 0.85; % Συντελεστής εκπομπής στάτη
eFe = 0.3;
ePM = 0.9;
a_i = 0.659;
e2 = eFe*(1-a_i)+ePM*a_i; % Συντελεστής εκπομπής αέρα
Rr1 = ((1-e1)/(e1*A1)-1/(A1*F12)-(1-
e2)/(e2*A2))/(s*(theta1+273+theta2+273)*((theta1+273)^2+(theta2+273)^2)); %
Αντίσταση μεταφοράς θερμότητας μέσω ακτινοβολίας μεταξύ στάτη και δίσκων
δρομέα

% Διάκενο αέρα
Rc2 = 1/(h_rs*pi/4*((2*rout_disc)^2-(2*rin_disc)^2)); % Θερμική αντίσταση
συναγωγής μεταξύ διακένου και δίσκου δρομέα
m = p*Q; % Μάζα ροής αέρα
c_p = 1005;
theta_alpha = 23; % Θερμοκρασία ατμόσφαιρας

% Δίσκος δρομέα
Rc3 = 4/(h_fr*pi*(2*rout_disc)^2); % Αντίδραση μεταφοράς θερμότητας μέσω
συναγωγής από εξωτερική επιφάνεια δίσκου στην ατμόσφαιρα
Rc3p = 4/(h_p*pi*2*rout_disc*d_disc); % Αντίδραση μεταφοράς θερμότητας μέσω
συναγωγής από περιφέρεια δίσκου στην ατμόσφαιρα

% Εξισώσεις αρχής διατήρησης ενέργειας
eq1 = 1/2*(DP_lw+DP_e)-(theta1-theta2)/Rc1-(theta1-theta3)/((1-e1)/(e1*A1)-
1/(A1*F12)-(1-
e2)/(e2*A2))/(s*(theta1+273+theta2+273)*((theta1+273)^2+(theta2+273)^2));
eq2 = (theta1-theta2)/Rc1-(theta2-theta3)/Rc2-2*m*c_p*(theta2-theta_alpha);
eq3 = (theta2-theta3)/Rc2-(theta1-theta3)/((1-e1)/(e1*A1)-1/(A1*F12)-(1-
e2)/(e2*A2))/(s*(theta1+273+theta2+273)*((theta1+273)^2+(theta2+273)^2))+1/
2*DP_rot-(theta3-
theta_alpha)/4/(0.0300857*(218294.922^2+32317140.4*(theta3-
theta2))^1/4)*pi*(2*rout_disc)^2-(theta3-theta_alpha)/Rc3p;

% Επίλυση συστήματος εξισώσεων
sol = solve(eq1,eq2,eq3);
t1 = double(sol.theta1) % Θερμοκρασία στάτη
t2 = double(sol.theta2) % Θερμοκρασία διακένου
t3 = double(sol.theta3) % Θερμοκρασία δρομέα

```

Βιβλιογραφία

- [1] Παπαδόπουλος, Μιχ. Π., “Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές”, Ε.Μ.Π. 1997.
- [2] Protocol, Kyoto. "United Nations framework convention on climate change", Kyoto Protocol, Kyoto (1997).
- [3] Piggott, Hugh., “How to Build a Wind Turbine”, 2005.
- [4] Gieras, Jacek F., Rong-Jie Wang, and Maarten J. Kamper. “Axial flux permanent magnet brushless machines. Vol. 1.” Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [5] Parviainen, Asko., “Design of axial-flux permanent-magnet low-speed machines and performance comparison between radial-flux and axial-flux machines”, Acta Universitatis Lappeenrantaensis, 2005.
- [6] Kostenko M., and Piotrovsky L., “Electrical Machines. Vol.1: Direct Current Machines and Transformers”, Moscow: Mir Publishers, 1974.
- [7] Wong, W. Y., “Heat transfer for engineers”, Longmans, 1977.
- [8] Owen, J.M., “An approximate solution for the flow between a rotating and a stationary disk”, ASME Journal of Turbomachinery Vol. 111, No.4, pp.323-332.,1989.
- [9] Owen, J.M., “The Reynolds analogy applied to flow between a rotating and a Stationary disc”, Int. Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.14, pp.451-460., 1971.
- [10] Engelmann R.H., and Middendorf W.H. (ed.), “Handbook of electric motors”, Marcel Dekker, Inc., New York, 1995.
- [11] Spooner E., and Chalmers B.J., “TORUS: a slotless toroidal-stator, permanent-magnet generator”, Proc. of IEE, Pt. B EPA Vol. 139, pp.497-506, 1992.
- [12] Τσιτσιμελής Αχ., “Μελέτη και σχεδίαση γεννητριών αξονικής ροής με χρήση αλγόριθμων εξελικτικού υπολογισμού για μικρές ανεμογεννήτριες αγροτικών εφαρμογών”, Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., 2013.
- [13] Λαναράς Ευάγγελος Λ., “Θερμική Ανάλυση Κινητήρα Μονίμων Μαγνητών”, Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., 2011.
- [14] <http://greenterrafirma.com/wind-turbine-furling.html>
- [15] Μεσσήνης Γεώργιος, “Βελτιστοποίηση, προσομοίωση και κατασκευή μικρής ανεμογεννήτριας για εφαρμογές χαμηλού κόστους και μελέτη της AC και DC σύνδεση”, Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., 2011.
- [16] Consortium for Sustainable Village-Based Development, <http://www.villageearth.org/appropriate-technology/appropriate-technology-sourcebook>

- [17] Κοτσαμπόπουλος Π., “Μελέτη, κατασκευή και προσομοίωση της λειτουργίας μικρής ανεμογεννήτριας αξονικής ροής”, Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., 2010.
- [18] Ζαρόγιαννης Θ. Αθανάσιος, “Σχεδίαση, Βελτιστοποίηση και Προσομοίωση Μικρών Ανεμογεννητριών για Εφαρμογές Χαμηλού Κόστους για Σύνδεση στο Δίκτυο”, Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., 2012.
- [19] Chan C.C., “Axial-field electrical machines with yokeless armature core”, PhD Thesis, University of Hong Kong, 1982.
- [20] Gieras J.F., and Wing M., “Permanent magnet motor technology: design and applications”, 2nd ed., Marcel Dekker, New York, 2002.
- [21] Καμπανάκης Άγγελος, “Θερμική ανάλυση κινητήρα μόνιμων μαγνητών με πεπερασμένα στοιχεία και μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων”, Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., 2013.
- [22] <https://www.wikipedia.org/>
- [23] <http://www.engineeringtoolbox.com/>